Entscheidungshilfen für die Planung von Anlagen zum naßmechanischen Recycling von Betonrestmassen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der

Bauhaus – Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Oliver Ressel
aus Bochum

Für meine Eltern

Vorwort

Die vorgelegte Arbeit befasst sich mit dem nassmechanischen Recycling von Betonrestmassen. Obwohl in der Praxis derartige Recyclinganlagen zur Anwendung kommen, fehlen zur Zeit immer noch Aussagen über wesentliche Planungsparameter wie z. B. die Rührerleistung, die Klassiererleistung, das Trennverhalten des mechanischen Klassierers.
In diesem Sinne soll meine Arbeit ein Beitrag sein, die Entscheidung für die Auslegung der diversen Planungsparameter zu erleichtern.
Besonderen Dank für wertvolle Anregungen und weitreichende Unterstützung beim Entstehen dieser Arbeit schulde ich Frau Prof. Dr. - Ing. habil. A. Müller. Bei Herrn Prof. Dr. - Ing. W. G. Bargstädt und Herrn Prof. Dr. - Ing. W. Poppy bedanke ich mich für die kritische Durchsicht der Dissertation, was mit die Vornahme verschiedener Ergänzungen ermöglichte. Schließlich bedanke ich mich bei Frau Dr. U. Stark für die sorgfältige Ermittlung der Konverteilungskurven mit dem Laserbeugungsmessgerät.

Gutachter	:	Prof. Dr. - Ing. habil. A. Müller
		Prof. Dr. - Ing. W. G. Bargstädt
		Prof. Dr.-Ing. W. Poppy
Tag der Disputation	:	22.03.2004 in Weimar

Inhaltsverzeichnis

1. Problem und Aufgabe 1
1.1 Vorgehensweise 2

2. Grundlagen der Recyclingtechnik 4
2.1 Entwicklung von Restbetonrecyclinganlagen 4
2.2 Stoffkreislauf für Restbeton 6
2.3 Eigenschaften der Recyclingprodukte 8
2.3.1 Restbetonzuschlag 8
2.3.2 Restwasser 10
2.3.2.1 Veränderungen durch Feinstoffe 11
2.3.2.2 Veränderungen durch Zusatzmittelverbindungen und weitere Stoffe 13

3. Führung der Materialströme 15
3.1 Input-Materialströme 15
3.1.1 Restbeton des Fuhrparks 15
3.1.2 Restbeton des stationären Mischers 17
3.1.3 Oberflächenwasser 17
3.2 Output-Materialströme 18
3.2.1 Restbetonzuschlag 18
3.2.2 Anmachwasser 19
3.3 Inside-Materialströme 21
3.3.1 Restwasser aus dem mechanischen Klassierer 21
3.3.2 Spülwasser 21
3.3.3 Weitere Materialströme 22

4. Klassieren der Betonreste in Restbetonzuschlag und Restwasser 24
4.1 Grundlagen der Materialtrennung 24
4.2 Bautechnische Kenndaten 26
4.3 Verfahrenstechnische Kenndaten 27
4.3.1 Durchsätze 27
4.3.2 Güte der Klassierung 30
4.3.2.1 Theoretische Grundlagen 31
4.3.2.2 Experimentelle Untersuchungen zur Klassiergüte 33
4.3.2.3 Ergebnisse der experimentellen Untersuchung 38

5. Restwasserbehandlung 50
5.1 Grundlagen der Suspendierung 50
5.2 Bautechnische Kenndaten 54
5.2.1 Anordnung im Grundriss und in der Ansicht 54
5.2.2 Größe des Suspendierraumes 55
5.3 Maschinentechnische Kenndaten 58

6. Weitere Komponenten der Recyclinganlage ... 61
6.1 Wassergalgen ... 61
6.2 Abscheider ... 62

7. Systemtechnik ... 64
7.1 Einführung ... 64
7.2 Zielsystem ... 64
7.2.1 Aufstellung des Zielsystems ... 65
7.2.2 Struktur des Zielsystems ... 65
7.2.3 Interdependenzen ... 66
7.3 Bewertung ... 67
7.3.1 Nominale Skalierung ... 68
7.3.2 Ordinale Skalierung ... 68
7.3.3 Kardinale Skalierung ... 69
7.3.4 Wertsynthese ... 71

8. Nutzwertanalytische Auswertung ... 72
8.1 Aufstellung des Zielsystems ... 72
8.2 Zusammenstellung der Projektziele ... 72
8.2.1 Qualitätssicherung der Recyclingprodukte ... 74
8.2.2 Minimierung der Ablagerungen ... 76
8.2.3 Bemessungen ... 80
8.2.4 Betriebspraktikabilität ... 85
8.2.5 Interdependenzen ... 91
8.3 Bestimmung der Zielwertmatrix inklusive Zielgewichtung und Wertsynthese ... 94
8.4 Anwendung der Bewertungsmethode auf vorhandene Recyclinganlagen ... 96

9. Zusammenfassung ... 98

10. Literatur- und Schrifttumsverzeichnis ... 103
ANHANG 1 Verifizierung anhand von Praxisbeispielen ... 108
ANHANG 2 Versuchsergebnisse ... 123

Abbildungen:

Bild 1: Schema des Stoffkreislaufs Restbeton 6
Bild 2: Schnitt Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde 7
Bild 3: Grundriss Restbetonrecylinganlage Ludwigsfelde 7
Bild 4: Änderung der Korngrößenverteilung beim Restbetonrecycling 9
Bild 5: Verfahrensweisen bei der händischen Dichtemessung 12
Bild 6: Radiometrische Dichtemessung an der Anmachwasserleitung 13
Bild 7: Materialströme bei der Restbetonaufbereitung 16
Bild 8: Anmachwasserleitung mit Tauchpumpe 19
Bild 9 a, b, c: Schneckenklassierer für das Restbetonrecycling in Ansicht und Draufsicht einer installierten Anlage 25
Bild 10: Anzapfmodell der turbulenten Querstromklassierung bezogen auf die Restbetonklassierung 25
Bild 11: Anordnung des mechanischen Klassierers in Bezug zur Geländeoberkante 27
Bild 12: Volumendurchsätze des mechanischen Klassierers 29
Bild 13: Stoffströme beim Klassieren 31
Bild 14: a) grafische Darstellung der Fraktionsbilanz (modifiziert nach Stieß [115] S. 260)
b) Trenngradkurve (modifiziert nach Stieß [115] S. 260) 32
Bild 15: Probenahme zur Bestimmung der Korngrößenverteilung der Feststoffe im Restbeton 36
Bild 16: Zusammenhang zwischen Entleerdurchsatz und Klassierdurchsatz 40
Bild 17: Zusammenhang zwischen Masseausbringen rbz und Entleerdurchsatz nass 41
Bild 18: Zusammenhang zwischen Masseausbringen rbz und Klassierdurchsatz nass 41
Bild 19: Korngrößenverteilung von Restbeton, Restbetonzuschlag und Restwasser 42
Bild 20: Trenngradverlauf 43
Bild 21: Zusammenhang zwischen dem nassen Klassierdurchsatz und dem KG-Anteil < 125 µm im Restbetonzuschlag 44
Bild 22: Zusammenhang zwischen dem nassen Klassierdurchsatz und der Trennkorngröße 44
Bild 23: Zusammenhang zwischen dem KG-Anteil > 125 µm im Restwasser und dem Klassierdurchsatz 45
Bild 24: Zusammenhang zwischen dem KG-Anteil > 125 µm im Restwasser und dem Entleerdurchsatz 45
Bild 25: Modellvorstellung zum Fehlkorngehalt im Restbetonzuschlag 47
Bild 26: Restbetonzuschlagproben mit unterschiedlichem Fehlkorngehalt 48
Bild 27: Suspendierbecken beim Restbetonrecycling 50
Bild 28: Strömungsbild im Suspendierbecken 51
Bild 29: Bodenformen von Rührbehältern (nach Stieß [115] S. 201) 51
Bild 30: Rührerformen für das Suspendieren 52
Bild 31: teilweise Suspension (nach Geisler [29] S. 10) 53
Bild 32: vollständige Suspension (nach Geisler [29] S. 10) 54
Bild 33: Zu- und Abflüsse des Suspendierbeckens nach Bild 7 56

Bild 34: Aufteilung des Suspendierraumes 57
Bild 35: Modifizierte Froude-Zahl als Funktion des Durchmesser-Verhältnisses, berechnet für einen Propellerrührer D/d=3, H/D=1 ([122]) 59
Bild 36: Wassergalgen 62
Bild 37: Vorklassierer 62
Bild 38: Abscheider 63
Bild 39: Zielsystemstruktur (nach [134]) 66
Bild 40: Darstellung der Zielbeziehungen (nach [134]) 67
Bild 41: Zielsystem beim Restbetonrecycling 73
Bild 42: Nutzwertanalyse am Beispiel der Recyclinganlage in Ludwigsfelde 95
Bild 43: Recycling von Betonrestmassen 98

Tabellen:

Tabelle 1: Typen von mechanischen Klassierern 5
Tabelle 2: Sollwerte für die Variation des Entleerdurchsatzes bei den Auswaschversuchen 37
Tabelle 3: Entleerdurchsätze 38
Tabelle 4: Messwerte der Restbetontrübe während der Feldversuche 38
Tabelle 5: Messwerte beim Restbetonzuschlag während der Feldversuche 39
Tabelle 6: Entleer- und Durchlaufzeiten und daraus berechnete Durchsätze 39
Tabelle 7: Massenausbringen 40
Tabelle 8: Partikelmerkmale 44
Tabelle 9: Zusammensetzung der Proben 47
Tabelle 10: Varianten bei der Verwendung des Restbetonzuschlages 74
Tabelle 11: Varianten bei der Art der Dichtemessung 75
Tabelle 12: Varianten bezüglich des Suspensionszustandes im Suspendierbecken 76
Tabelle 13: Ausführung der Suspendierbecken im Grundriss 77
Tabelle 14: Varianten bezüglich der Ausführung in der Ansicht 78
Tabelle 15: Varianten zur Führung des Materialstromes MS_4 79
Tabelle 16: Varianten bezüglich der Ausführung der Anmachwasserleitung 80
Tabelle 17: Varianten bezüglich der Auswaschleistung 81
Tabelle 18: Varianten bezüglich des Trennverhaltens 83
Tabelle 19: Varianten bei der Größe des Suspendierraumes 84
Tabelle 20: Varianten bezüglich der Anordnung der Suspendierbecken in der Ansicht 85
Tabelle 21: Varianten bezüglich der Anordnung des Klassierers in Bezug zur Geländeoberkante 86
Tabelle 22: Varianten bei der Führung des Materialstromes MS_6 87
Tabelle 23: Varianten bezüglich der Führung des Oberflächenwassers 88
Tabelle 24: Varianten bei der Führung des Materialstromes MS_1 89
Tabelle 25: Varianten der Führung des Materialstromes MS_3 90
Tabelle 26: Varianten der Führung des Materialstromes MS_{11} 91
Tabelle 27: Interdependenzen 92
Tabelle 28: Ermittlung der Zielbeziehungen bei Projektzielen, die sich auf die Anordnung des mechanischen Klassierers zum Dispergierbecken in der Ansicht beziehen 93
Tabelle 29: Nutzwertbewertung nach Abiturpunktesystem 94
Tabelle 30: Vergleich der Nutzwerte der bewerteten Restbetonrecyclinganlagen 96

Abkürzungen:

Soweit im Text nicht anders angegeben, gelten die folgenden Bezeichnungen:

AW	Anmachwasser
EDS	Entleerdurchsatz
KG	Korngröße
MA	Mischanlage
MK	Mechanischer Klassierer
MS	Materialstrom
OW	Oberflächenwasser
PZ	Projektziel
RB	Restbeton
RBZ	Restbetonzuschlag
RW	Restwasser
SB	Suspendierbecken
SP	Saugpumpe
SW	Spülwasser
TP	Tauchpumpe
tv	Teilversenkt
üf	Überflur
uf	Unterflur

Formelzeichen:

Soweit im Text nicht anders angegeben, gelten die folgenden Bezeichnungen:

$?_{RW}$	kg/dm^3	:	Dichte des Restwassers
$?_{FS}$	kg/dm^3	:	Dichte des Feststoffes im Restwasser
φ_v	-	:	Feststoffvolumenanteil der Suspension
a	kg/m^3	:	Wirkstoffkonzentration im Beton
BV	%	:	Betonverflüssigergehalt in % vom Zementgehalt
D	m	:	Durchmesser des Suspensionsbeckens
d	m	:	Durchmesser des Rührorgans
d_p	µm	:	Partikeldurchmesser
D_S	m	:	Schraubendurchmesser
Fr*	-	:	Modifizierte Froude-Zahl
F_{RBZ}	%	:	Restbetonzuschlagfehlanteil
fsrw	%	:	Feinstoffe im RW - Ausbringen
G	kg/m^3	:	Gesteinskörnungsgehalt
g_i	-	:	Gewicht der Projektziele
GW	kg/m^3	:	Gesamtwasser
H	m	:	Höhe des Suspensionsbeckens
$H_{min,F}$	m	:	Niedrigste Abgabehöhe der Fahrzeuge
h_T	m	:	Höhe des Aufgabetrichters
m_{FSRW}	kg	:	Feststoffmasse der Feinstoffe im Restwasser
m_{RB}	kg	:	Feststoffmasse der Restbetontrübe
m_{RBZ}	kg	:	Feststoffmasse des Restbetonzuschlags
$\dot{M}_{FSRW}$	t/h	:	Feinstoff – Feststoffmassedurchsatz
$\dot{M}_{RBZ}$	t/h	:	Grobgut – Feststoffmassedurchsatz
$\dot{M}_{theo}$	m^3/h	:	Theoretischer Förderdurchsatz
n	-	:	Umdrehungsgeschwindigkeit des Rührorgans
N	-	:	Nutzwert
N_S	-	:	Anzahl der Schrauben beim mechanischen Klassierer
n_S	-	:	Schraubendrehzahl
N_V	-	:	Volumenstromzahl
N_{VS}	-	:	Volumenstromzahl der Suspension
$q_{FSRW}(x)$	%	:	Kornfraktionsanteil der Feinstoffe im RW an der Korngröße x
$q_{RB}(x)$	%	:	Kornfraktionsanteil des RB an der Korngröße x
$q_{RBZ}(x)$	%	:	Kornfraktionsanteil des RBZ an der Korngröße x
rbz	%	:	RBZ – Masseausbringen

R_{hj}	m	:	Ränge in der Zielertragsmatrix
SW	kg/m^3	:	Spülwasser
T(x)	%	:	Trenngrad
t_{FZ}	s	:	Fahrzeugspezifischer Zeitfaktor
t_{MB}	s	:	Zeitfaktor für das Leerfahren des Materialbettes
$\dot{V}_{IST}$	m^3/h	:	Vorhandener Volunendurchsatz
$\dot{V}_{RB,kon}$	m^3/h	:	Experimenteller Klassierdurchsatz im kontinuierlichen Betrieb
$\dot{V}_{RB,dis}$	m^3/h	:	Experimenteller Klassierdurchsatz im diskontinuierlichen Betrieb
$\dot{V}_{Soll}$	m^3/h	:	Erforderlicher Volumendurchsatz
$\dot{V}_{theo}$	m^3/h	:	Theoretischer Volumendurchsatz
W	kg/m^3	:	Anmachwasser
w_s	m/s	:	Einzelkornsinkgeschwindigkeit
WS_{Beton}	kg/m^3	:	Aufkonzentrierte Wirkstoffkonzentration im Beton
WS_{RW}	kg/m^3	:	Aufkonzentrierte Wirkstoffkonzentration im Restwasser
w_{ss}	m/s	:	Sinkgeschwindigkeit im Schwarm
x_t	µm	:	Trennkorngröße
Z	kg/m^3	:	Zementgehalt
ZW	kg/m^3	:	Zugabewasser
e	%	:	Lückenvolumenanteil der Feststoffschüttung

1. Problem und Aufgabe

In Deutschland werden pro Jahr ca. 60 Mio. m³ Transportbeton hergestellt [63]. Etwa 3% dieser Betonproduktion werden nicht verarbeitet, d. h. ca. 1,8 Mio. m³ bzw. 3,6 Mio. t pro Jahr [25]. Diese Betonrestmasse stammt aus verschiedenen Quellen, beispielsweise aus Beton, der vom Kunden nicht abgenommen wurde, oder Beton, der nach der Lieferung an den Innenwänden der Trommelbehälter der Lieferfahrzeuge haftet. Die Kosten für die Deponierung des Restbetons sind hoch und liegen zum Teil bei 130,00 € pro Tonne. Die Deponien, von denen Restbeton noch angenommen wird, werden immer seltener.

Zum einen ist vor dem Hintergrund abnehmender bzw. wirtschaftlich nicht mehr erschließbarer Rohstoffreserven bei gleichzeitiger Verknappung von Deponieraum die ökonomische wie ökologische Notwendigkeit von Recycling für alle Produktionsbereiche unbestreitbar. Zum anderen werden die Produzenten durch gesetzliche Vorschriften angehalten, anfallende Restmassen wiederzuverwerten [135],[136],[137].

Für die Transportbetonindustrie bedeutet diese Entwicklung einen schrittweisen Übergang von einer reinen Entsorgungstechnik zu einer Materialwirtschaft mit geschlossenen Stoffkreisläufen. Dies erfordert neue Technologien.

So werden zwar Anlagen und Geräte angeboten, mit denen Restbeton in Restbetonzuschlag und Restwasser klassiert sowie das Restwasser suspendiert werden können (**Tabelle 1**). Die Planung dieser Anlagen erfolgt jedoch überwiegend durch learning-by-doing, so dass in der Regel Detailprobleme ungeklärt bleiben. Auch die über das Klassieren und Suspendieren hinaus erforderlichen Recyclingschritte sind bisher in der Praxis nur ansatzweise gelöst. Insbesondere handelt es sich bei der Aufbereitung von Restbeton um ein System von verschiedenen, in gegenseitiger Abhängigkeit von einander stehenden Bauteilen und Apparaten, deren Größen bzw. Wertigkeiten nicht durch Kennwerte festgelegt sind. Auch die verfahrenstechnische Behandlung der Recyclingprodukte ist nicht optimal gelöst. Als Beispiel seien die Ablagerungen an den Recyclinggeräten genannt.

An die Recyclingprodukte Restwasser und Restbetonzuschlag werden stoffkundliche Anforderungen gestellt [90]. Hierbei ist die Substitution der üblicherweise verwendeten Rohstoffe durch Recyclingprodukte betontechnologisch in weiten Teilen geklärt [119], [120]. Allerdings besteht in der Praxis weitgehend Unklarheit, wie eine Recyclinganlage maschinen- und bautechnisch geplant und betrieben werden muss, damit die Recyclingprodukte den betontechnologischen Anforderungen gerecht werden. Es hat sich gezeigt, dass z. B. generelle Beschränkungen bei der Verwendung von Restwasser oder Kriterien hinsichtlich der Rieselfähigkeit von Restbetonzuschlag in der Praxis nur schwer umzusetzen sind.

Die Kriterien, die beim Bau und Betrieb einer Restbetonrecyclinganlage zu berücksichtigen sind, sind demnach vielfältig und stellen den Entscheidungsträger vor eine komplexe Situation. Fehlentscheidungen können gar nicht oder nur mit großem, nicht zuletzt finanziellem Aufwand rückgängig gemacht werden. Zahlreiche Besichtigungen und Fachgespräche, die der Autor geführt hat, haben gezeigt, dass insbesondere in den Unternehmen Entscheidungshilfen fehlen, die den oben beschriebenen Problemkreis betreffen (unbekannte Kennwerte der eingesetzten Maschinen und Geräte, teilweise

ungeklärte verfahrenstechnische Behandlung der Recyclingprodukte und nicht eindeutige Beschreibung des Prozesses zum Erzeugen anforderungsgerechter Recyclingprodukte).
Die vorliegende Arbeit soll die komplexe Entscheidungssituation transparenter gestalten, um die Entscheidung umfassend, zielorientiert und effizient vorbereiten zu können. Hierbei wird der nass-mechanische Recyclinganlagentyp besprochen, der die heute gängige Praxis des Restbetonrecyclings in den Betonwerken darstellt. Dieser Typ umfasst nach dem Stand der Technik folgende grundsätzliche Verfahrensstufen:

- Klassieren des Restbetons in Restbetonzuschlag und Restwasser mit Hilfe eines mechanischen Klassierers (MK),
- Vorhalten des Restbetonzuschlags in Lagerboxen und des Restwassers in Suspendierbecken zur Wiederverwendung (SB).

In die Untersuchung werden nicht einbezogen:

- Festbeton, Bauschutt oder ähnliche Materialien,
- konstruktive Bemessungen aller Art (Behälterwandungen, Rührerwelle...),
- Kriterien, die überwiegend monetären Charakter haben (z. B. Energieverbrauch, Reparaturkosten, Wartungskosten, Personalkosten sowie Finanzierungs- und Fiskalaspekte).

Diese Einschränkung erfolgt, um den Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen.

Da die Anzahl der Kriterien, die Einfluss auf die vorliegende Entscheidungssituation nehmen, so groß ist, dass die Urteilsperson ohne Entscheidungshilfen nicht zu einem sachlich begründeten Urteil kommen kann, sollen die maßgebenden Kriterien für die Entscheidungsfindung innerhalb eines allgemein gültigen Ablaufschemas zusammengeführt und bewertet werden.

1.1 Vorgehensweise

Im ersten Teil der Arbeit werden die Grundlagen der Recyclingtechnik erläutert. Aufbauend auf einer empirischen Analyse mit Hilfe von Literaturrecherchen, Besichtigungen, eigenen Versuchen sowie dem Studium von betrieblichen Lenkungsprozessen und Qualitätssicherungssystemen, werden die für die Entscheidungsfindung wesentlichen betontechnologischen und verfahrenstechnischen Grundlagen besprochen. Hierbei werden potentielle Materialströme, klassier- und suspendiertechnische Grundlagen sowie die sich daraus ergebenden Kennwerte für die Maschinen und Geräte erläutert. Insbesondere wird auch das Oberflächenwasser als Bestandteil des Recyclingprozesses beschrieben. Darüber hinaus wurden im Rahmen dieser Arbeit Versuchsreihen durchgeführt. Mit Hilfe der Versuche soll das Trennverhalten eines mechanischen Klassierers unter besonderer Berücksichtigung der Fehlkornausträge im Restbetonzuschlag untersucht werden. Die Versuchsreihen wurden zur Entwicklung eines Entscheidungskriteriums hinsichtlich der Rieselfähigkeit des Restbetonzuschlags erforderlich [90]. Grundsätzlich wird bereits im ersten Teil das Ziel verfolgt, die für das optimale Restbetonrecycling relevanten Entscheidungskriterien herauszukristallisieren.
Im zweiten Teil werden die Grundlagen zur Erstellung eines aus der Systemwissenschaft abgeleiteten allgemein gültigen Ablaufschemas zur Entscheidungsfindung entwickelt. Ziel und Aufgabe der Systemwissenschaft ist es, Erkenntnisse zu gewinnen und Methoden zu entwickeln, mit deren Hilfe

Handlungsempfehlungen in Hinblick auf konkrete Aktionsaufgaben gegeben werden können [134]. Die Systemwissenschaft stellt mit der Nutzwertanalyse eine Methode bereit, die bei der hier anstehenden Problematik verwendet werden kann. ”Die Nutzwertanalyse eignet sich zur vollständigen Erfassung, zumindest aber zur approximativen Lösung realer Probleme dank der Berücksichtigung multidimensionaler Zielsetzungen und einer widerspruchsfreien Verarbeitung der Informationen gemäß den Anforderungen der modernen Entscheidungstheorie besonders gut" [4]. Nachdem im Rahmen der Nutzwertanalyse die Projektziele mit den Entscheidungsalternativen verglichen und bewertet wurden, wird das System der Ziele auf Widerspruchsfreiheit überprüft. Anschließend werden die Projektziele untereinander gewichtet. Die konkrete Entscheidungshilfe wird im Rahmen der Wertsynthese ermittelt, bei der jeder der Entscheidungsalternativen der Nutzwert zugewiesen wird.

Im dritten Teil wird das entwickelte Ablaufschema angewandt. Hierzu ist es erforderlich, aus den recyclingtechnischen und betontechnologischen Grundlagen ein Zielsystem zu erstellen, mit dessen Hilfe die Entscheidungen bei der Planung von Anlagen zum nassmechanischen Recycling von Restbetonmassen allgemeingültig vorgenommen und kontrolliert werden können. Dabei lassen sich die Ergebnisse der empirisch-analytischen Untersuchung in Hinblick auf die Projektziele in zwei Entscheidungskategorien einordnen:

- quantifizierbare Projektziele (objektive Projektziele) und
- nicht quantifizierbare Projektziele (subjektive Projektziele).

Die Projektziele werden nach dem Prinzip der Nutzenmaximierung bewertet, indem die Alternative zu wählen ist, bei der die gewogenen Zielerfüllungsgrade den höchsten Wert ergeben. Zum Aufzeigen von Verbesserungspotentialen und zur Verifizierung wird die Nutzwertanalyse am Ende der Arbeit auf bestehende Anlagen angewendet.

2. Grundlagen der Recyclingtechnik

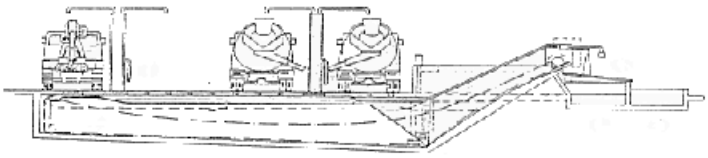
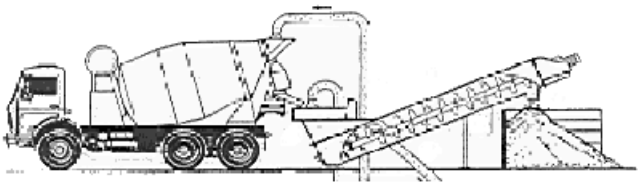
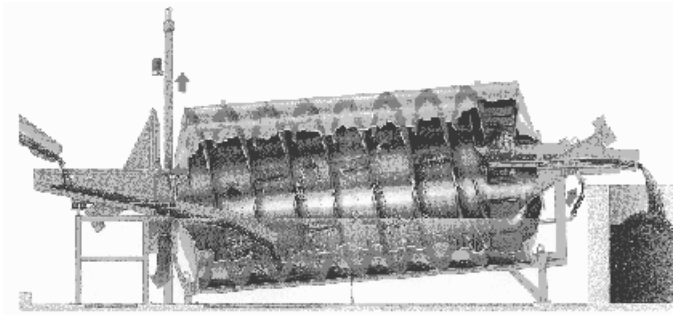
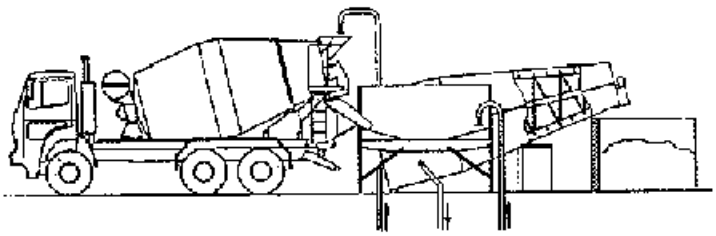
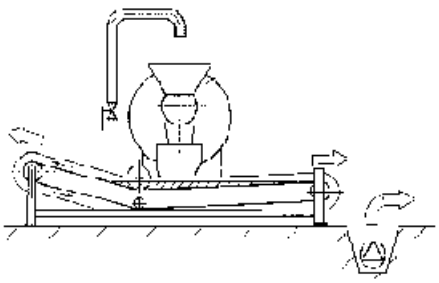
2.1 Entwicklung von Restbetonrecyclinganlagen

Vor der Inbetriebnahme der ersten Versuchsanlagen für Restbetonrecycling Anfang der 80er Jahre wurden die frischen Betonreste der Transportbetonwerke nach der Tagesproduktion in Absetzgruben gespült. Über Nacht haben sich die Feststoffe abgesetzt und das über den Feststoffen stehende "klare Wasser" konnte für die Betonproduktion verwendet werden. Der aus den abgesetzten Feststoffen bestehende "stichfeste Schlamm" wurde auf Deponien entsorgt.
Die Notwendigkeit des vollständigen Restbetonrecyclings hat sich seit dem Ende der 70er Jahre aus folgenden Gründen stetig weiterentwickelt und gesteigert:

- Ressourcenschonung,
- Verknappung von Deponieraum,
- ökonomischer Relevanz,
- ökologischer Relevanz,
- Verschärfung von Umweltbestimmungen.

Beginnend mit dem Versuch, zunächst über Siebklassierungsmethoden dem stichfesten Schlamm Feinstoffe zu entnehmen und wiederzuverwenden, wurden sehr bald erste Geräte aus der kiesaufbereitenden Industrie für das Restbetonrecycling verwendet [67]. Hierbei kamen Hydrobandabscheider und auch mechanische Schneckenklassierer zum Einsatz (**Tabelle 1**) [25], [75], [77]. Die ersten Einsätze waren in den meisten Fällen gekoppelt mit dem Versuch, die Feinstoffe vor oder nach der Klassierung zu separieren und getrennt zu dosieren oder zu entsorgen. Mit dem Einsatz von Suspendierbecken ab Ende der 80er Jahre wurde der letzte Schritt zum Betrieb der Restbetonrecyclinganlage des heutigen Typus getan. Parallel hierzu wurden auch neue Geräte für die Klassierung entwickelt. Es kamen mechanische Klassierer mit Krählwerken, Auswaschtrommeln und Kombinationen aus Auswaschtrommeln und Auswaschschnecken zum Einsatz (**Tabelle 1**) [55], [60], [74], [76], [114], [115].
Heute werden nur noch mechanische Schneckenklassierer, Auswaschtrommeln oder Kombinationen aus beiden Geräten verwendet.
Bei einer Waschtrommel handelt es sich um eine leicht geneigte Trommel, die sich um ihre Längsachse dreht. Sie besteht aus dem Aufgabebereich, in dem die Reststoffe in das Innere der Waschtrommel befördert werden. Im Waschbereich werden die Reststoffe getrennt. Im Bereich der Austragseinrichtungen werden das Restwasser und der Restbetonzuschlag aus der Trommel gefördert. Die Gerätekombinationen aus Schneckenklassierer und Auswaschtrommel arbeiten sehr unterschiedlich.
Im folgenden werden aufgrund der größten Einsatzhäufigkeit nur die mechanischen Schneckenklassierer behandelt.
Die in **Tabelle 1** skizzenhaft dargestellten Typen von mechanischen Klassierern sind diversen Firmenprospekten entnommen.

Tabelle 1: Typen von mechanischen Klassierern

Trennverfahren	Funktionsschema
1.1. Mechanischer Klassierer mit Krählwerk	
1.2. Mechanischer Klassierer mit Schnecke	
1.3. Auswaschtrommel	
1.4. Kombination aus Auswaschtrommel und Schneckenklassierer	
1.5. Hydrobandabscheider	

2.2 Stoffkreislauf für Restbeton

Unabhängig von der spezifischen maschinentechnischen Ausgestaltung einer Recyclinganlage für Restbeton kann das in **Bild 1** dargestellte Schema für den Stoffkreislauf Restbeton zugrundegelegt werden. Die folgenden Überlegungen werden sich auf die Abläufe innerhalb der farblich unterlegten Teile von **Bild 1** konzentrieren.

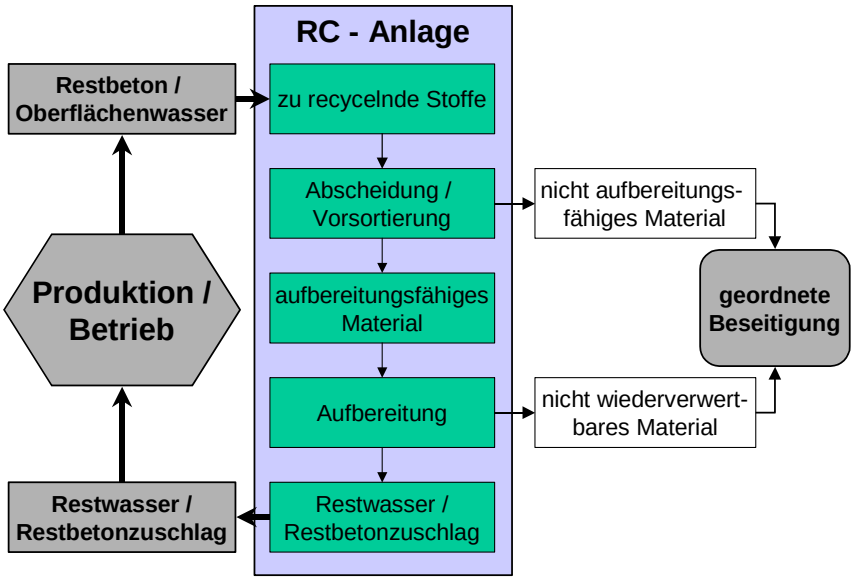


Bild 1: Schema des Stoffkreislaufs Restbeton

Der Kreislauf beginnt mit dem Eingang der zu recycelnden Stoffe. Im wesentlichen handelt es sich hierbei um Restbeton und Oberflächenwasser (z. B. Regenwasser). Dabei muss zwischen nicht aufbereitungsfähigem und aufbereitungsfähigem Material unterschieden werden. Nicht aufbereitungsfähige Materialien, die durch die Abscheidung oder Vorsortierung ausgesondert werden, sind Restmengen, die aufgrund ihrer die Recyclingprodukte schädigenden Wirkung nicht in den Recyclingprozess gelangen dürfen. Hierzu können zählen:

- Öle oder Fette, z. B. aus der LKW-Aussenreinigung,
- Feinanteile <0,063 mm, z. B. von LKW-Reifen,
- stahlangreifende Stoffe, z. B. Tausalze,
- Anhydrit, z. B. aus der Estrichproduktion.

Mit der Aufbereitung, die in zwei Verfahrensstufen vorgenommen wird, beginnt das eigentliche Restbetonrecycling. Auch hier ist zwischen nicht wiederverwertbaren und wiederverwertbaren Materialien zu unterscheiden. Zu den nicht wiederverwertbaren Anteilen des Restbetons gehören insbesondere:

- Ablagerungen in den Recyclinggeräten,
- schwimmfähige Stoffe, z. B. Styroporkugeln.

Wiederverwertbar sind das aus der Aufbereitung hervorgehende Restwasser und der zurückgewonnene Restbetonzuschlag.

Der Kreislauf wird mit der Wiederverwertung des aufbereiteten Materials für neue Betonmischungen und der Lieferung des neuen Betons auf die Baustelle und der erneuten Rückführung von Restbeton geschlossen.

Die geordnete Entsorgung des nicht aufbereitungsfähigen und des nicht wiederverwertbaren Materials wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

Als Ausführungsbeispiel ist in **Bild 2** eine Restbetonrecyclinganlage dargestellt. Die Anlage ist eine Komponente eines Transportbetonwerkes südlich von Berlin in Ludwigsfelde.

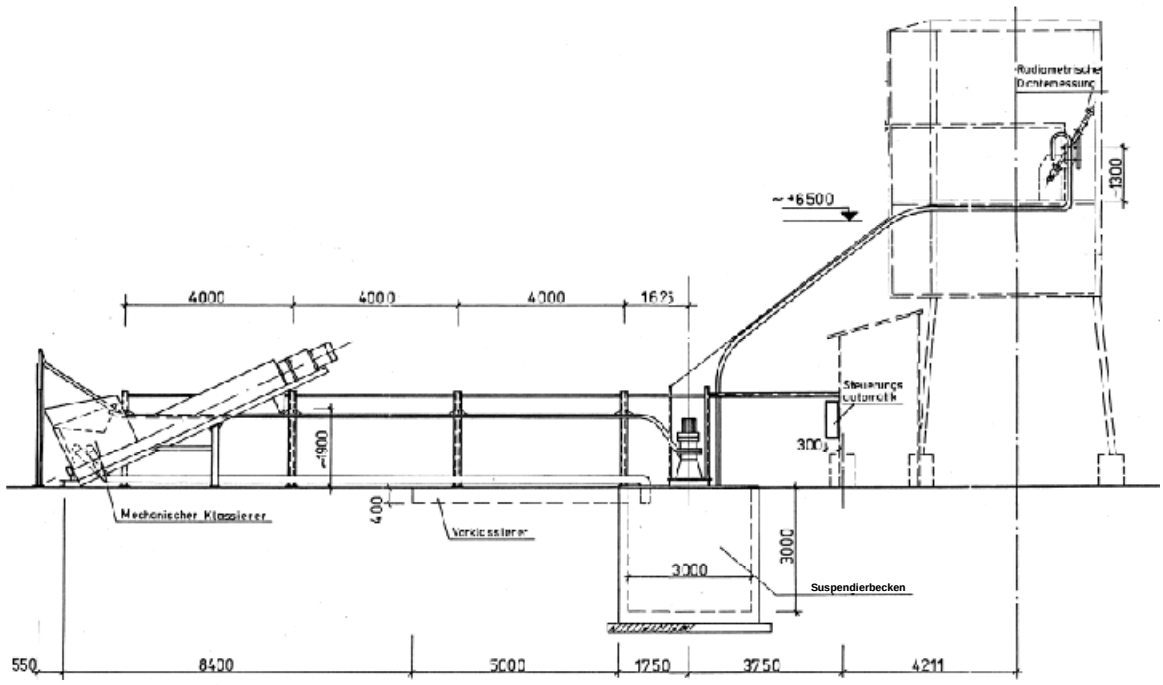


Bild 2: Schnitt Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde

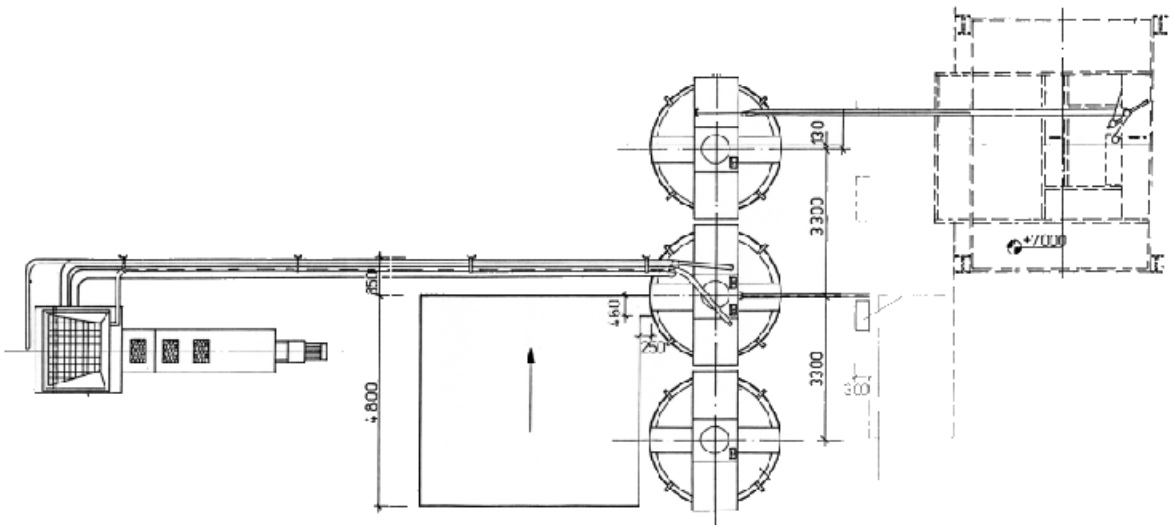


Bild 3: Grundriss Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde

Die beiden Hauptkomponenten der Anlage sind der mechanische Klassierer (technische Daten auf S. 34) zum Trennen des Restbetons in Restbetonzuschlag und Restwasser sowie drei Suspendierbecken (technische Daten S. 58) zum Vorhalten des Restwassers als Anmachwasser. Darüber hinaus verfügt die Anlage über einen Vorklassierer zum Reinigen von z. B. Betonpumpen und über eine radiometrische Dichtemessung für die online-Bestimmung des Feststoffgehaltes im Restwasser.

2.3 Eigenschaften der Recyclingprodukte

An die Ausgangsstoffe für die Herstellung von Beton werden Anforderungen gestellt, die im Normen- und Richtlinienwerk festgelegt sind. Die Normen und Richtlinien zur Herstellung von Beton sind zwar lediglich Empfehlungen. Da die Anwendung dieser Normen jedoch im Normalfall von den Betonabnehmern verlangt wird, entspricht annähernd der gesamte in Deutschland produzierte Beton den gültigen Normen und Richtlinien. Daher werden diese Anforderungen auch der Beurteilung der Recyclingprodukte Restbetonzuschlag und Restwasser zugrundegelegt. Hierzu wird geprüft, ob die Eigenschaften der Recyclingprodukte die Anforderungen an die bei der Betonproduktion verwendeten Ausgangsstoffe erfüllen bzw. welche recyclingtechnischen Voraussetzungen erfüllt werden müssen, damit die Anforderungen eingehalten werden. Aufbauend darauf werden die verfahrenstechnischen Möglichkeiten aufgezeigt, die Veränderungen der Eigenschaften auszugleichen bzw. rückgängig zu machen. Es erfolgt demnach keine Betrachtung, wie die Recyclingprodukte die Betoneigenschaften beeinflussen, sondern vielmehr eine Beschreibung der Recyclingtechnik, die erforderlich ist, um eine negative Beeinflussung der Betoneigenschaften durch Recyclingprodukte zu vermeiden.
Diese recyclingtechnischen Voraussetzungen fließen ebenfalls als entscheidungsmaßgebende Kriterien in das allgemeingültige Ablaufschema zur Entscheidungsfindung ein.

2.3.1 Restbetonzuschlag

Der Begriff Restbetonzuschlag ist im technischen Regelwerk definiert als: “Zuschlag aus Restbeton mit einer Korngröße in der Regel größer als 0,2 mm” [90]. Der Restbetonzuschlag hat mit Ausnahme der Korngruppe und der Feinkornart dieselben Eigenschaften wie der in DIN 4226 genormte Betonzuschlag (Lieferkörnung).
Beim Recycling findet zunächst eine Veränderung der Korngrößenverteilung statt. Für die Betonproduktion werden verschiedene Korngruppen (z. B. 0/2mm, 2/8mm, 8/16mm, 16/32mm) entsprechend vorgegebener Rezepturen gemischt. Diese Korngruppengemische erhält man beim Restbetonrecycling als Restbetonzuschlag zurück. Da im Alltagsbetrieb verschiedene Betonsorten in unterschiedlicher und zumeist unbekannter Menge recycelt werden, ist der Restbetonzuschlag ein Mischkies, der eine nicht vorhersagbare, allerdings im Betonbau übliche Sieblinie hat.
Exemplarisch ist die Veränderung der Korngrößenverteilung in **Bild 4** dargestellt.

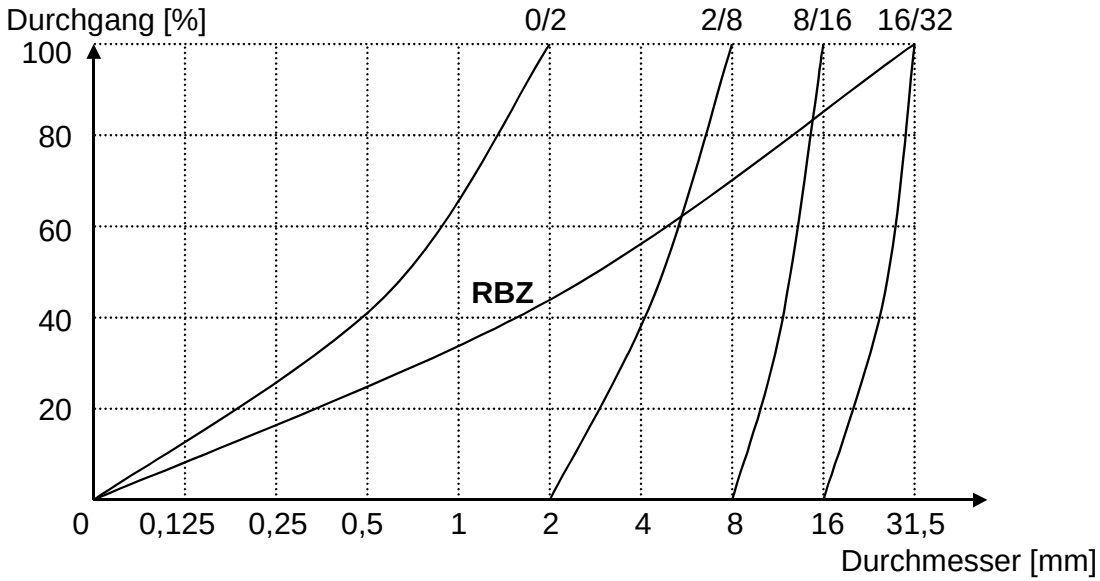


Bild 4: Änderung der Korngrößenverteilung beim Restbetonrecycling

Durch die Änderung der Korngrößenverteilung muss bei der Betonproduktion mit Restbetonzuschlag die Vorgehensweise im Vergleich zur Herstellung des Betons mit Lieferkörnung modifiziert werden, um die in der Eignungsprüfung projektierte Sieblinie innerhalb der zulässigen Schwankungsbreite einzuhalten [84]. In der Praxis haben sich hierfür fünf Methoden entwickelt:

- Die erste Methode sieht eine weitere Klassierung des Restbetonzuschlages nach den genormten Kornfraktionen vor. Hierdurch wird die Änderung der Korngrößenverteilung rückgängig gemacht. Dieses Verfahren bietet sich insbesondere an, wenn bereits eine Siebanlage vorhanden ist und dadurch z. B. der Transport zu einer Siebanlage entfällt.
- Die zweite in der Praxis angewandte Methode sieht vor, den Restbetonzuschlag ungeprüft für “unbewehrten Beton” (<B25) zu verwenden. Allerdings müssen alle Gesteinskörnungen, die für Betone nach DIN 1045 verwendet werden, auch die Anforderungen der DIN 4226 erfüllen. Eine Verwendung des Restbetonzuschlags für unbewehrte Betone muss daher als nicht zulässig betrachtet werden.
- Zulässig dagegen ist die in der Richtlinie für Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel beschriebene dritte Vorgehensweise: “Der Restbetonzuschlag ist den Vorratsbehältern mit der größten Korngruppe gleichmäßig in so kleinen Mengen zuzugeben, dass die zulässigen Abweichungen von der bei der Eignungsprüfung gewählten Sieblinie insgesamt eingehalten werden” [90]´. Die Praktikabilität und die Genauigkeit dieser Methode ist allerdings nicht sehr hoch, da die Zugabe des Restbetonzuschlags in die Materialbox durch “volumetrisches Abschätzen” vorgenommen werden muss. Hier werden an die verantwortlichen Mitarbeiter hohe Anforderungen gestellt, da beim Befüllen des Aktivlagers das Zuschlagmaterial danach zu beurteilen ist, ob in Hinblick auf die Grenzen für Unterkorn das Hinzufügen von Restbetonzuschlag noch möglich ist oder nicht. Zugleich muss der Restbetonzuschlag hinsichtlich der enthaltenen Unterkornbestandteile bewertet werden.

- Eine vierte Methode sieht vor, den Restbetonzuschlag bei ausreichender Anzahl an Aktivlagern getrennt zu bevorraten und zu dosieren. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass der zulässige Grenzwert für das Unterkorn durch Verwiegung des Restbetonzuschlags nicht unterschritten wird, sofern die anzurechnenden Unterkornbestandteile des Restbetonzuschlags bekannt sind.
- Die fünfte Methode besteht darin, den Restbetonzuschlag nicht für die Produktion von Beton zu verwenden, sondern beispielsweise als Straßenunterbau an Tiefbauunternehmen zu veräußern.

Hinsichtlich der Änderung der Korngruppen lassen sich Entscheidungshilfen aufstellen (Projektziel 1, S. 74).
Zusätzlich zur Änderung der Korngrößenverteilung findet während des Recyclingprozesses eine Veränderung der Feinkornart und -menge statt. Das für die Betonproduktion verwendete Zuschlagmaterial nach DIN 4226 ist, je nach Aufbereitungsprozess, mit inerten Feinanteilen befrachtet. Während der Betonherstellung vermischen sich diese Feinanteile mit dem Bindemittel im Frischbeton. Die Menge und die Korngrößenverteilung des Feinanteilgemisches im Restbetonzuschlag hängen vom Trennverhalten des mechanischen Klassierers ab. Die bewusste Steuerung der Eigenschaften des Restbetonzuschlags setzt also Kenntnisse über das Trennverhalten des mechanischen Klassierers voraus. Im weiteren wird dieses Kriterium bei den maschinentechnischen Kenndaten des mechanischen Klassierers berücksichtigt (Kap. 4.1).

2.3.2 Restwasser

Im technischen Regelwerk wird der Begriff Restwasser wie folgt definiert [90]:
“Restwasser setzt sich betriebsbedingt zusammen aus dem

- Wasser, das aus dem Restbeton wiedergewonnen wird,
- Waschwasser, das zum Auswaschen des Betonzuschlages benutzt wird,
- Spülwasser, das zum Reinigen des stationären Zwangsmischers, der Fahrmischertrommeln und der Betonpumpen erforderlich ist,
- Wasser, das beim Sägen, Schleifen und Wasserstrahlen von erhärtetem Beton anfällt,
- Niederschlagwasser,
- Frischwasser.”

Im Vergleich zu dem üblicherweise verwendeten Anmachwasser sind demnach weitere Stoffe oder Stoffgemische im Restwasser enthalten. Dies sind zum einen Feinstoffe, die in Abhängigkeit vom Trennverhalten des mechanischen Klassierers im Restwasser enthalten sind (Kap. 4.1). Zum anderen ist das Restwasser mit Zusatzmittelgemischen und ggf. weiteren Stoffen aus dem Oberflächenwasser befrachtet. Die Dichte des Restwassers (Feinstoffgehalt) schwankt unvorhersagbar im Bereich von 1,01 $kg \cdot dm^{-3}$ bis 1,07 $kg \cdot dm^{-3}$, teilweise darüber. Die Feinstoffzugabe mit dem Restwasser soll die Eigenschaften des mit Restwasser hergestellten Betons nicht nachteilig verändern.

2.3.2.1 Veränderungen durch Feinstoffe

Betriebsbedingt können folgende Feinstoffe im Restwasser vorkommen:

- Inerte Feinsandanteile
- Hydratationsprodukte des Zementes
- Unhydratisierter Zement
- Flugasche
- Gesteinsmehl

Diese fünf Feinstoffarten sind in nicht vorhersagbarer Konzentration und mit unterschiedlichem Alter im Restwasser enthalten. Der mit Restwasser hergestellte Beton wird im Vergleich zu dem üblicherweise verwendeten Anmachwasser zum einen chemisch (Reaktivität) und zum anderen physikalisch (Füllereffekt, Oberflächenvergrößerung) beeinflusst.

Bezüglich der chemischen Beeinflussung lassen die Ablagerungen durch Feinstoffe im Restwasser in den Suspendierbecken und den Leitungen den Schluss zu, dass die Feinstoffe noch ein gewisses Maß an Reaktivität besitzen (Kap. 5.1). Die Eigenschaften der Feinstoffe im Restwasser ändern sich unvorhersehbar, da nicht vorausgesagt werden kann, welche Betone in welchen Mengen recycelt werden müssen. Aus diesem Grund ist eine Messung des Faktors für die Reaktivität nicht möglich. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Reaktivität der Feinstoffe im Restwasser keine negative Beeinflussung in der neuen Betonmischung hervorruft. Eher werden Dichtigkeit und Festigkeit des neuen Betons erhöht.

Auch die Ausgangskonsistenz und das weitere Ansteifverhalten werden bei der Verwendung von Restwasser nicht beeinträchtigt [120].

Bei den Feinstoffen im Restwasser handelt es sich um Partikel mit unterschiedlichen Korndurchmessern. Auch hier gilt, dass sich die Kornverteilung im Restwasser permanent durch neu hinzukommende Recyclingprodukte oder Hydratationsvorgänge verändert. Betontechnologisch sind Feinstoffe im Restwasser als Mehlkorn und Feinstsand einzustufen (DIN 1045). Diese Norm bewertet zwar nicht die Korngrößenverteilung, jedoch den Gehalt an Mehlkorn und Feinstsand. Bei den Feinstoffen im Restwasser kann analog verfahren werden, da die Restwasser-Richtlinie bestimmt: “Durch Zugabe von Mehlkorn oder Frischwasser ist dafür zu sorgen, dass die durch die Eignungsprüfung festgelegten Werte für den Mehlkorn- sowie den Mehlkorn- und Feinstsandgehalt eingehalten werden” [90].

Der Gehalt an Mehlkorn und Feinstsand im Restwasser kann durch Dichtemessung bestimmt und überwacht werden. Da der Gehalt an Mehlkorn und Feinstsand im Restwasser auch während der Produktion schwankt, nimmt der Grad der Erfüllung der Richtlinie mit zeitlich enger aufeinanderfolgenden Messvorgängen zu. Die möglichst genaue Einhaltung der Restwasser-Richtlinie erfordert somit auch eine hohe Qualität der internen Arbeitsabläufe.

Zur Dichtemessung von Trüben sind zahlreiche Verfahren entwickelt worden [130]. Grundsätzlich kann zwischen der händisch und der automatisiert durchgeführten Messung unterschieden werden. Damit die Dichtemesswerte repräsentativ sind, muss das als Zugabewasser verwendete Restwasser in den Suspendierungseinrichtungen in den Zustand einer homogenen Suspension gebracht worden sein (Kap. 5.1).

Händische Dichtemessung

Für die Durchführung des Messverfahrens wird mit einem geeignetem Schöpfgefäß unmittelbar nach Abstellung des Rührwerkes der Suspendiereinrichtung eine Restwasserprobe entnommen. Da die Aräometermessung wegen der sich schnell absetzenden Feinstoffe zu falschen Ergebnissen führt, wenn sie nicht unmittelbar nach der Restwasserentnahme durchgeführt wird, können drei Verfahrensweisen angegeben werden [72] (**Bild 5**):

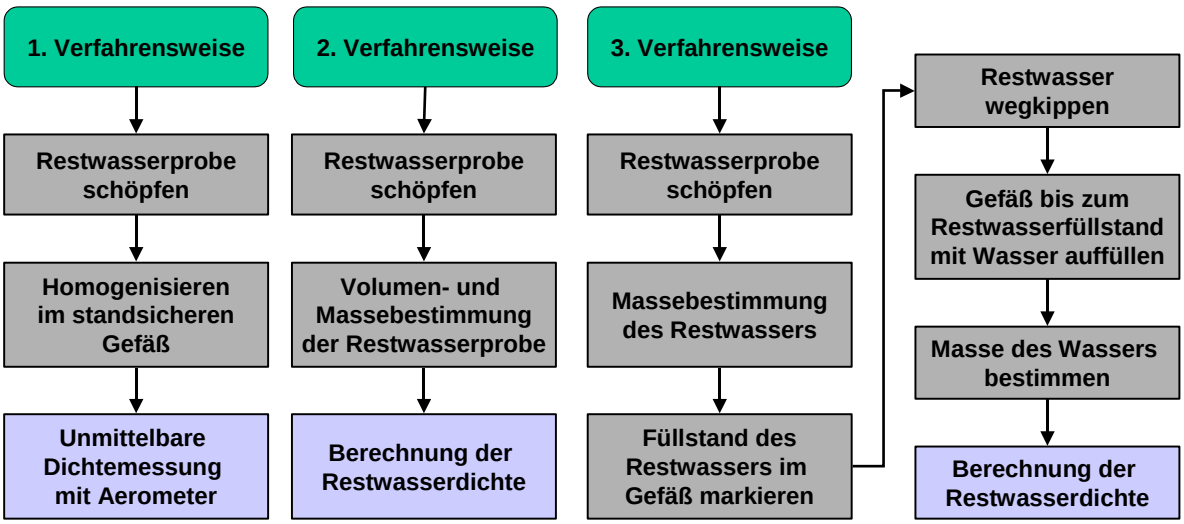


Bild 5: Verfahrensweisen bei der händischen Dichtemessung

In der Restwasser-Richtlinie ist die Häufigkeit der Dichtemessung vorgeschrieben: “Die Dichte des Restwassers muss einmal täglich, wenn die höchste Dichte zu erwarten ist, bestimmt werden” [90]. Dieser Zeitpunkt liegt in der Regel nach dem abendlichen Auswaschen der Fahrmischer bzw. vor Beginn der morgendlichen Produktion. Für den Fall des Rückbetonrecyclings müssen eventuell zusätzliche Dichtemessungen vorgenommen werden, da sich erhebliche Schwankungsbreiten ergeben können. So gelangen z. B. bei einer Rückbetonmenge von 8 m³ (eine Wagenladung) ca. 3,2 t Feinstoffe in die Suspendierbecken. Bei einer Suspendierbeckengröße von ca. 60 m³ (Restbeton-recyclinganlage Ludwigsfelde) verteilen sich 53,3 $kg \cdot m^{-3}$ Feinstoffe in den Suspendierbecken. Dies erhöht die Restwasserdichte durchschnittlich um ca. 0,05 $kg \cdot m^{-3}$.

Der bei der Dichtemessung ermittelte Wert findet wie folgt Berücksichtigung: “Aus der Dichtebestimmung und der zugegebenen Restwassermenge ist der Feststoffgehalt zu ermitteln und bei der Betonzusammensetzung zu berücksichtigen” [90]. Da der Feinstoffgehalt im Restwasser eine hohe Schwankungsbreite aufweist, kann es so zu Schwankungen im Mehlkorn- und Feinsandgehalt des Betons kommen. Durch das rasche Absetzen der Feinstoffe besteht jedoch bei der händischen Dichtemessung grundsätzlich die Gefahr, keine repräsentative Probe zu erhalten.

Automatische Dichtemessung

Zur Vermeidung von Defiziten der händischen Dichtemessung sind versuchsweise Messeinrichtungen, die nach unterschiedlichen Verfahren arbeiten (z. B. optisch), in die Suspendierbecken montiert worden, um die Dichtemessung automatisch durchzuführen.

Die Problematik bei der automatischen Dichtemessung innerhalb der Suspendierbecken besteht darin, dass sich fest eingebaute Messapparate innerhalb kurzer Zeit mit einer Schicht aus reaktiven Feinstoffen überziehen. Hierdurch wird die Funktionsfähigkeit der Messapparate beeinträchtigt. Aus diesem Grund kommt nur ein Messverfahren in Betracht, bei dem die Messapparatur nicht mit dem Restwasser in Berührung kommt. Ein solches Messverfahren nach dem Prinzip der radiometrischen Dichtemessung ist in [22] beschrieben (**Bild 6**). Bei regelmäßiger Kalibrierung in dreimonatigen Abständen ist das Gerät wartungsfrei und von hoher Messgenauigkeit. Die gemessenen Dichtewerte werden online an die Anlagensteuerung übergeben und können dort automatisch berücksichtigt werden.

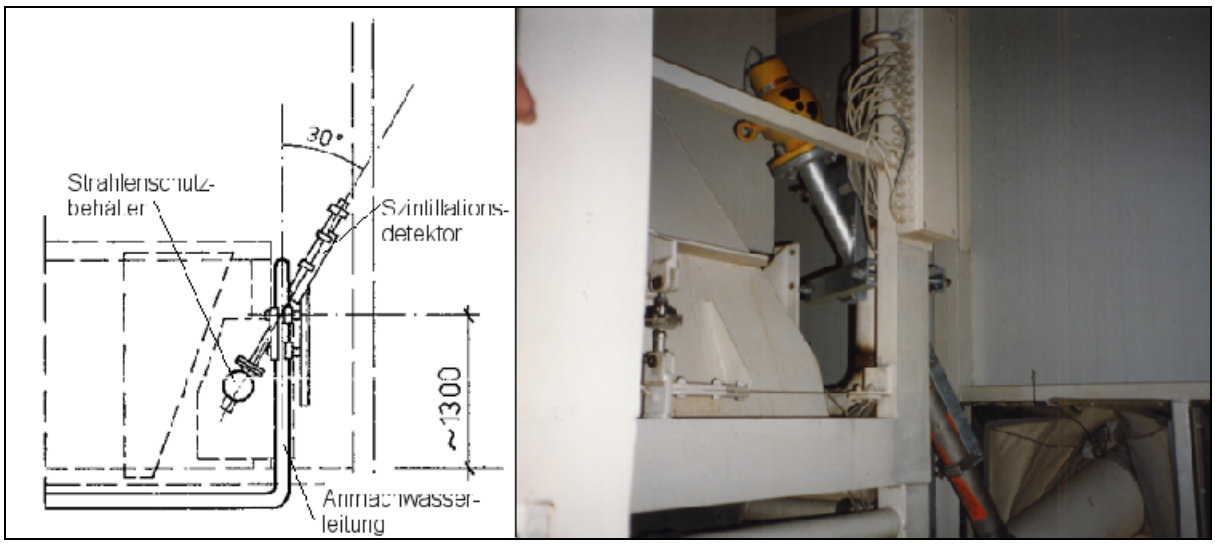


Bild 6: Radiometrische Dichtemessung an der Anmachwasserleitung

Bei diesem Messverfahren wird durch eine in einem Strahlenschutzbehälter befindliche Strahlenquelle eine Gammastrahlung erzeugt. Hiermit wird die Anmachwasserleitung des Transportbetonwerkes durchstrahlt. Das Signal trifft anschließend auf einen Szintillationsdetektor. Die Schwächung der Strahlungsintensität wird von dem Detektor bestimmt und in ein Dichtemessergebnis überführt.
Die Ungenauigkeiten bei der Durchführung der händischen Messungen und die Unsicherheit bezüglich der Auswahl des Messzeitpunktes entfallen. Die ständige Kontrolle der Feinstoffgehalte im Restwasser macht die unvorhersehbaren Schwankungen im Mehlkorn- und Feinsandgehalt des Betons beherrschbar.
Hinsichtlich der Dichtemessung lassen sich Entscheidungshilfen aufstellen (Projektziel 2, S. 74).

2.3.2.2 Veränderungen durch Zusatzmittelverbindungen und weitere Stoffe

Neben den Feststoffen können auch gelöste Stoffe sowie dispergierte Flüssigkeiten im Restwasser vorkommen. Dies sind zum einen Zusatzmittel, die in bestimmten Betonmischungen zum Einsatz kommen, zum anderen können weitere Stoffe aus dem Oberflächenwasser in das Restwasser gelangen. Hierbei muss durch die Installation von Abscheidern oder betriebliche Maßnahmen sichergestellt werden, dass die Grenzwerte für die Beurteilung von Zugabewasser aus dem DBV-Merkblatt "Zugabewasser für Beton" nicht überschritten werden [88]. Dies gilt insbesondere für Öl und Fette aus der Fahrzeugreinigung, für Detergentien aus der Fahrzeugreinigung sowie für Chloride durch Taumitteleinsatz (vgl. Kap. 6.2).

Zum anderen können über das Restwasser Zusatzmittelgemische und die darin enthaltenen Wirkstoffe in neue Betonmischungen gelangen. Zur Erstellung einer Datenbasis für die Restwasserbeschaffenheit wurde die Analyse von 14 Restwasser aus 11 verschiedenen Transportbetonwerken beschrieben [119]. So konnte einerseits eine irreversible Bindung der eingesetzten Wirkstoffe (Calcium-Ligninsulfonat und Tetrakaliumpyrophosphat) an die Zementpartikel festgestellt werden. Die Wirkstoffe standen für weitere Reaktionen nicht mehr zur Verfügung. Auch ohne diese Sorption der Wirkstoffe konnte andererseits in theoretischen Betrachtungen und Beispielrechnungen mit praxisnahen Eingangsparametern gezeigt werden, dass sich die Wirkstoffkonzentration im Restwasser unter normalen Produktionsbedingungen sehr schnell asymptotisch einem Grenzwert nähert, der nur unwesentlich über der Ausgangskonzentration liegt. „Eine darüber hinausgehende Aufkonzentration des Zusatzmittelwirkstoffs im RW-Becken kann somit ausgeschlossen werden."
Hierbei gelten folgende Zusammenhänge [119]:

- für den aufkonzentrierten Wirkstoffgehalt im Restwasser WS_{RW}

$$WS_{RW} = \lim_{R\to\infty} \sum_{i=0}^{R} \frac{a}{GW} b^i = \frac{a}{SW} \quad [kg/kg] \qquad \textbf{(Gl. 1)}$$

mit $b = \frac{ZW}{GW}$ und GW = ZW +SW

wobei a: Wirkstoffkonzentration im Beton [kg/m³]
GW: Gesamtwasser [kg/m³]
SW: Spülwasser [kg/m³]
ZW: Zugabewasser [kg/m³]

- für die aufkonzentrierte Wirkstoffkonzentration in der neuen Betonmischung WS_{Beton}

$$WS_{Beton} = \lim_{R\to\infty} \sum_{k=0}^{R} a \cdot b^k = \frac{a}{1-b} \quad [kg/kg] \qquad \textbf{(Gl. 2)}$$

mit $|b| < 1$

Somit ergibt sich für eine praxisübliche Mischungszusammensetzung mit

Z = 270 kg/m³
W = ZW = 180 kg/m³
G = 1850 kg/m³
BV = 0,2 M-% v Z (Wirkstoffgehalt = 40%)
SW = 1500 kg/m³

$$WS_{Beton} = \frac{a}{1-b} = \frac{0{,}2 \cdot 270}{1 - \frac{180}{180+1500}} = 0{,}6 \ [kg/kg]$$

Das heißt bei der Verwendung von endlos aufkonzentriertem Restwasser erhöht sich die Wirkstoffkonzentration im neuen Beton im Gegensatz zur Verwendung mit Frischwasser von 0,54 kg/kg auf 0,6 kg/kg ohne Berücksichtigung der Sorption bei diesem Rechenbeispiel mit praxisüblichen Eingangswerten.
Aufgrund dieser geringen Auswirkungen kann davon ausgegangen werden, dass die Zusatzmittelverbindungen nicht mit einem Entscheidungskriterium berücksichtigt werden müssen.

3. Führung der Materialströme

Die beiden technologischen Hauptkomponenten einer Restbetonrecyclinganlage sind der mechanische Klassierer und das Suspendierbecken. Daneben ist ein Wassergalgen für die Spülwasserbefüllung erforderlich. Optional kann die Anlage noch mit weiterem Zubehör wie Abscheider, Vorklassierer und Reservebecken ausgestattet werden. Die wesentlichen im Betonwerk vorhandenen Einrichtungen Fuhrpark, Lager für Gesteinskörnungen, öffentliches Leitungsnetz, Mischanlage und Hofoberfläche sind mit der Recyclinganlage gekoppelt.
Grundsätzlich lassen sich die Materialströme in drei Kategorien gliedern:

- Materialströme, die in die Recyclinganlage hineinführen (schwarz in **Bild 7**), im folgenden Input-Materialströme genannt
- Materialströme, die aus der Recyclinganlage herausführen (rot in **Bild 7**), im folgenden Output-Materialströme genannt
- Materialströme, die innerhalb der Recyclinganlage geführt werden (blau in **Bild 7**), im folgenden Inside-Materialströme genannt.

Im folgenden werden die Materialströme, die Varianten, sie zu führen sowie die sich hieraus ergebenden Entscheidungskriterien dargestellt.

3.1 Input-Materialströme

3.1.1 Restbeton des Fuhrparks

Dieser Input-Materialstrom bestimmt maßgeblich die quantitative Dimension aller weiteren Materialströme. Im Normalbetrieb werden der Recyclinganlage bei der nachmittäglichen Reinigung der Fahrzeuge 2,5 m³ Restbeton (bei kleineren Betonwerken) bis zu 7,5 m³ (bei größeren Betonwerken) zugeführt. In extremen Einzelfällen müssen der Recyclinganlage bis zu 30 m³ Rückbeton in kurzer Zeit zugeführt werden.
Das Beschicken des mechanischen Klassierers mit Restbeton (MS_1 in **Bild 7**) kann durch diverse Fahrzeuge (z. B. Fahrmischer, Kübelbahn, Autobetonpumpe...) vorgenommen werden. Der hierbei zu berücksichtigende optimale zeitliche Ablauf wird in Kap. 4.3.1 besprochen.
Die Entleerhöhen der Fahrzeuge können stark unterschiedlich sein. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die tiefste Abgabehöhe zu ermitteln. Hiernach richtet sich die Beschickerhöhe des Aufgabetrichters des mechanischen Klassierers, die durch unterschiedliche Anordnung in der Ansicht (Unterflur, Teilversenkt oder Überflur) variiert werden kann. Es wird deutlich, dass Interdependenzen zwischen der Führung des Materialstromes “Restbeton des Fuhrparks” und der Anordnung des mechanischen Klassierers sowie des Suspendierbeckens in der Ansicht entstehen. Wenn man diese vermeiden möchte, ist es möglich, die Beschickung über einen Beschickerkübel durchzuführen, was allerdings mit einem zusätzlichen technischen Aufwand verbunden ist. Aus der erforderlichen Abgabehöhe lassen sich Entscheidungshilfen herleiten (Projektziel 15, S. 89).

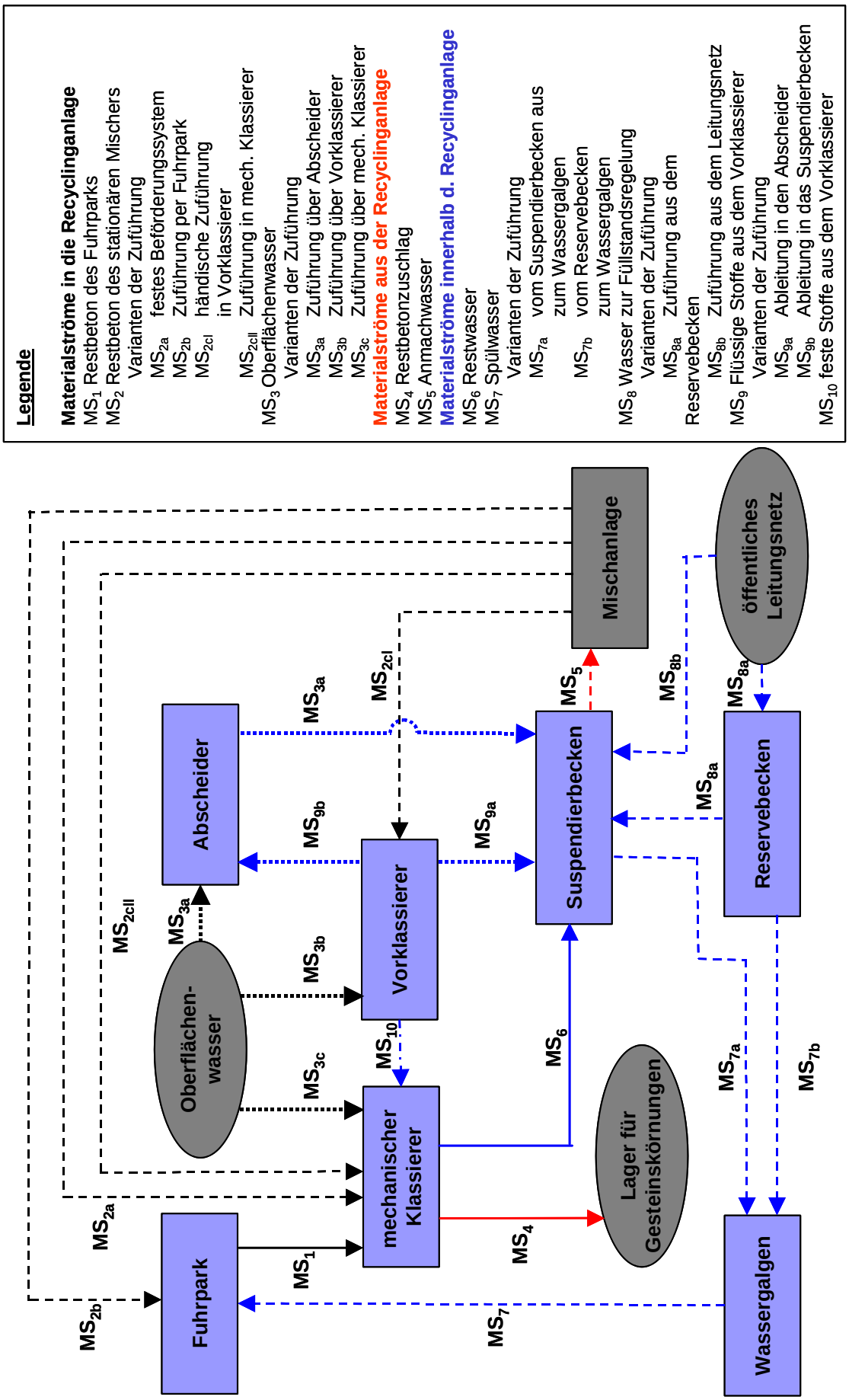


Bild 7: Materialströme bei der Restbetonaufbereitung

3.1.2 Restbeton des stationären Mischers

Vor Produktionspausen, die die Erhärtungszeit des verwendeten Zementes überschreiten sowie bei der abendlichen Reinigung muss auch der stationäre Mischer des Betonwerkes von Betonresten gesäubert werden (MS_{2a}, MS_{2b}, MS_{2cI} und MS_{2cII} auf **Bild 7**). Der daraus entstehende Materialstrom MS_2 kann in unterschiedlichen Varianten geführt werden:

- Die erste Möglichkeit der Zuführung besteht aus einem fest installierten Fördersystem, z. B. Materialrutsche, Kübelbahn (MS_{2a}). Mit Hilfe eines fest installierten Fördersystems kann das Spülen der Zwangsmischer autark vorgenommen werden. Allerdings führt die feste Installation zu technischem Mehraufwand, z. B. durch Installation, Wartung und Reinigung des Fördersystems. Des weiteren ist bei dieser Variante darauf zu achten, dass der mechanische Klassierer in unmittelbarer Nähe zum Mischturm angeordnet werden muss, da ein fest installiertes Fördersystem längere Distanzen nur mit großem Aufwand überbrücken kann.
- Eine weitere Möglichkeit besteht in der Integration des Materialstromes in den Materialstrom MS_1 "Restbeton des Fuhrparks" (Kap 3.1). Hierbei wird der bei der Säuberung der Zwangsmischer anfallende Restbeton in einen Fahrmischer (oder Radlader) geladen (MS_{2b}). Von nun an wird der Restbeton entsprechend dem Materialstrom "Restbeton der Fahrzeuge" behandelt. Hierbei müssen keine Zusatzmaßnahmen ergriffen werden. Mit der Säuberung kann erst begonnen werden, wenn ein geeigneter Fahrmischer (oder Radlader) zur Verfügung steht.
- Eine dritte Möglichkeit der Zuführung in den mechanischen Klassierer besteht darin, dass der Restbeton aus dem Mischbehälter auf die Fahrmischerfahrbahn entleert wird. Im folgenden wird der Restbeton händisch mit Hilfe von Wasserschläuchen weiterbefördert. Es bestehen zwei Möglichkeiten. Entweder die Weiterförderung erfolgt in den Vorklassierer (MS_{2cI}) und wird von dort entsprechend Materialstrom "Oberflächenwasser" (Kap. 3.1.3) behandelt. Oder der Restbeton des stationären Mischers gelangt in den mechanischen Klassierer (MS_{2cII}) (nur bei Unterflur-Installation) und wird ebenfalls entsprechend Materialstrom "Oberflächenwasser" behandelt. Hierbei sind keine Zusatzmaßnahmen nötig. Entsprechende Gefälleverhältnisse müssen vorhanden sein.

Hierauf aufbauend lassen sich hinsichtlich der Führung der Materialströme MS_2 konkrete Entscheidungshilfen aufstellen (Projektziel 16, S. 90).

3.1.3 Oberflächenwasser

Wenn das Oberflächenwasser die Anforderungen, die an das Anmachwasser für Beton gestellt werden, erfüllt, kann es in den Recyclingprozess einbezogen werden. Grundsätzlich wird zwischen drei Varianten unterschieden (vgl. MS_{3a}, MS_{3b}, MS_{3c} auf **Bild 7**). Das Oberflächenwasser ist allerdings in der Regel mit Stoffen befrachtet, die einer sofortigen Verwendung als Anmachwasser entgegenstehen. Hierbei handelt es sich z. B. um Staub, Öle und Fette der Fahrzeuge, Diesel aus dem Bereich von Tankanlagen oder abschlämmbare Bestandteile von LKW-Reifen nach Baustellenfahrten. Des weiteren ist es möglich, dass Chloride aus dem Winterstreudienst über die LKW-Reifen ebenso wie Detergenzien aus der Fahrzeugaußenreinigung auf das Werksgelände und somit in das Oberflächenwasser gelangen. Um die normativen Anforderungen an Anmachwasser

einzuhalten, wird eine Reinigung des Oberflächenwassers unerlässlich. Entsprechende Reinigungssysteme werden in Kap. 6.2 erläutert.

Der Ort, zu dem das Oberflächenwasser geführt wird, (Hofeinlauf) muss der tiefste Punkt auf dem Werksgelände sein. Wenn die Anordnung eines Pumpensumpfes nicht vorgesehen ist, ergeben sich folgende Varianten für die Führung des Oberflächenwassers:

- Während des Betriebs der Recyclinganlage wird das Anmachwasser dem Suspendierbecken entnommen. Aus diesem Grund besteht eine Variante der Wiederverwendung des Oberflächenwassers in der Einleitung in das Suspendierbecken. Der tiefste Punkt der Recyclinganlage ist hierbei der Einlauf in das Suspendierbecken. D.h. das Suspendierbecken muss Unterflur angeordnet werden. In der Regel ist eine Säuberung des Oberflächenwassers erforderlich. Daher wird es vorher durch einen Abscheider geleitet (MS_{3a}).
- Zur Minimierung der Klärmaßnahmen ist es möglich, einen vorhandenen Vorklassierer zur Sedimentation von Feststoffen und zum Abscheiden von Schwimmstoffen zu verwenden (Kap. 6.2). Danach wird das Oberflächenwasser über Materialstrom MS_{9a} zur Wiederverwendung weitergeleitet. In diesem Fall ist der Vorklassierer der tiefste Punkt (MS_{3b}). Die Weiterführung per Überlaufwehr setzt ebenfalls voraus, dass das Suspendierbecken bzw. das Reservebecken Unterflur angeordnet sind.
- Eine dritte Möglichkeit der Führung des Materialstromes Oberflächenwasser besteht in der Einleitung in den mechanischen Klassierer (Kap. 4). Hierbei wird das Oberflächenwasser direkt in den Aufgabetrichter geleitet (MS_{3c}). Entsprechend dem Trennschnitt des mechanischen Klassierers können nun Feststoffe ausgewaschen werden. Hiernach wird das interne Wasser über Materialstrom MS_4 zur Wiederverwendung weitergeleitet. Bei dieser Variante ist der Aufgabetrichter des mechanischen Klassierers der tiefste Punkt, d.h. der mechanische Klassierer muss Unterflur angeordnet sein. Bei dieser Variante muss sichergestellt sein, dass eine weitere Reinigung des Oberflächenwassers nicht erforderlich ist.

Die Ausführungen verdeutlichen die Interdependenzen (vgl. Kap 7.1.3) zwischen der Führung des Materialstromes “Oberflächenwasser” sowie der Anordnung des mechanischen Klassierers sowie des Suspendierbeckens in der Ansicht. Hierbei kann allerdings nicht unerwähnt bleiben, dass ggf. Höhenunterschiede auch durch Pumpen überwunden werden können. Dieses bedeutet aber einen zusätzlichen technischen Aufwand. Des weiteren bedingt die Führung dieses Materialstromes auch die Auswahl des Abscheiders. Gemeinsam mit den sich daraus ergebenden Kriterien lassen sich die Entscheidungshilfen angeben (Projektziel 14, S. 88).

3.2 Output-Materialströme

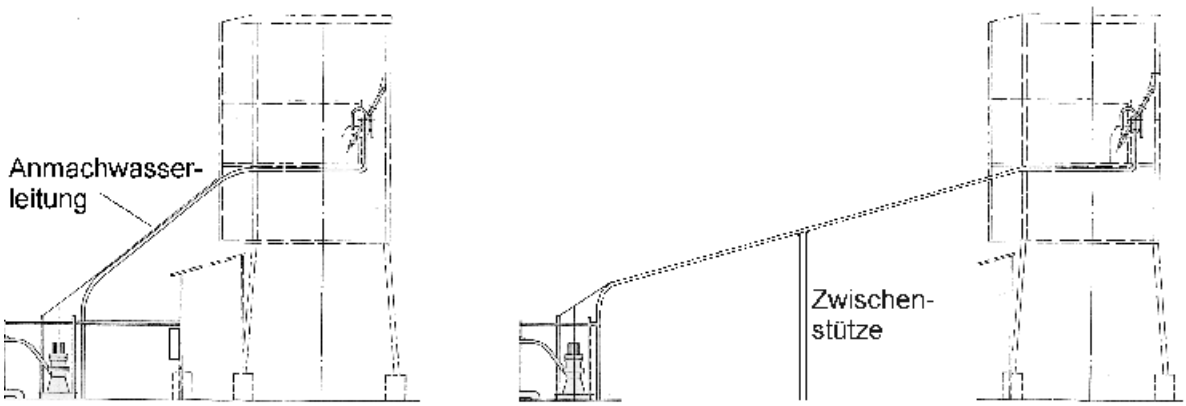
3.2.1 Restbetonzuschlag

Die Weiterbeförderung des Restbetonzuschlages vom mechanischen Klassierer zum Lager für Gesteinskörnungen des Transportbetonwerkes (MS_4 auf **Bild 7**) ist abhängig von der Abwurfhöhe des Austrages des mechanischen Klassierers. Einerseits kann ein Schüttkegel aufgebaut werden, der mit Hilfe spezieller Baumaschinen (z. B. Radlader) aufgenommen und weitergefördert wird. Andererseits ist es möglich, dass Restbetonzuschlag direkt in ein unter dem Austrag des mechanischen Klassierers

befindliches Fahrzeug (Kipper, Lore) gefüllt wird. Die Weiterbeförderung erfolgt dann in diesem Fahrzeug. Auch die Weiterführung durch ein nachgeschaltetes Förderband ist möglich.
Hierzu können Entscheidungshilfen (Projektziel 17, S. 90) angegeben werden.

3.2.2 Anmachwasser

Das Wasser aus den Trenn- und Reinigungsprozessen wird in den Suspendierbecken gesammelt und von dort als Materialstrom MS_5 der Mischanlage zugeführt. Die hierfür verwendeten Leitungen sind hinsichtlich Anbackungen an den Innenwandungen sensibel. Die Einflussnahme über das Ausmaß der Anbackungen erfolgt über die Auswahl der Pumpenart und die Anordnung der Suspendierbecken in Bezug zur Mischanlage.
Zur Förderung des Anmachwassers werden Saugpumpen, die außerhalb des Suspendierbeckens angeordnet werden, oder Tauchpumen, die innerhalb des Suspendierbeckens angeordnet werden, verwendet [54]. Der verfahrenstechnische Ablauf beim Dosieren mit einer Tauchpumpe sieht vor, dass die Dosierleitung nach dem Dosiervorgang entleert wird. Demgegenüber wird die Dosierleitung beim Dosieren mit einer Saugpumpe gefüllt gehalten. Hierbei ist zu beachten, dass die Gefahr von Anbackungen an der Innenwand der Dosierleitung bei der Verwendung von Saugpumpen tendentiell größer ist, da die Leitung über längere Zeiträume gefüllt bleibt und bei Stillstandzeiten die Feinstoffe sich an den Innenwandungen absetzen können. Bei längeren Stillstandzeiten (nächtliche Produktionspause, Wochenende) muss die Leitung händisch durch eine kleinere Montagearbeit an der Pumpe entleert werden.
Des weiteren muss dem Abstand zwischen Suspendierbecken und Mischanlage Beachtung geschenkt werden. Je weiter das Suspendierbecken von der Mischanlage entfernt ist, umso geringer wird die Steigung der Anmachwasserleitung. Je näher das Suspendierbecken an der Mischanlage angeordnet ist, desto steilere Ausführungen der Anmachwasserdosierleitung sind möglich (**Bild 8**). Bei Tauchpumpen hat dies zur Folge, dass die Geschwindigkeit, mit der sich die Leitung entleert, größer und die Gefahr von Anbackungen geringer wird. Bei Saugpumpen verkleinert sich mit steiler werdender Leitung der Anprallwinkel der sich absetzenden Feinstoffe in der Restwasserleitung. Auch hier wird durch eine steilere Leitung das Risiko von Anbackungen vermindert.
Hierauf aufbauend lassen sich Entscheidungshilfen (Projektziel 7, S. 80) angeben.



a) Recyclinganlage in unmittelbarer Nähe der Mischanlage

b) Recyclinganlage in entfernter Position zur Mischanlage

Bild 8: Anmachwasserleitung mit Tauchpumpe

3.3 Inside-Materialströme

3.3.1 Restwasser aus dem mechanischen Klassierer

Die Förderung des Restwassers aus dem mechanischen Klassierer zum Suspendierbecken (MS_6 in **Bild 7**) richtet sich nach der Anordnung des mechanischen Klassierers und des Suspendierbeckens in der Ansicht. Hieraus ergibt sich, in welchem Höhenverhältnis das Überlaufwehr des mechanischen Klassierers zum Restwassereinlauf des Suspendierbeckens steht. Es ergeben sich neun Varianten (vgl. **Tabelle 28**, S. 93) bei der Variation von Überflur-, Teilversenkt- oder Unterflur-Anordnung von Suspendierbecken und mechanischem Klassierer.

Bei positivem Gefälle (z. B. mechanischer Klassierer Überflur und Suspendierbecken Unterflur) kann die Restwasserförderung über ein Gerinne verwirklicht werden. Hierbei ist zu beachten, dass mit wachsender Entfernung der beiden Komponenten voneinander das Sohlgefälle des Gerinnes abnimmt und sich dadurch die Fließgeschwindigkeit vermindert. Je geringer die Fließgeschwindigkeit jedoch ist, desto mehr Feinstoffe können sich absetzen. Damit Ablagerungen einfach entfernt werden können, ist es zumindest bei geringem Sohlgefälle günstig, ein offenes Gerinne einzusetzen.

Bei negativem Gefälle (z. B. mechanischer Klassierer Unterflur und Suspendierbecken Überflur) gelangt das Restwasser zunächst vom Überlaufwehr des Klassierers in einen Pumpensumpf. Von dort aus wird das Restwasser mit Hilfe einer Pumpe in das Suspendierbecken gepumpt. Bei dieser Lösung ist das Problem der Ablagerungen im Pumpensumpf von zentraler Bedeutung. Ähnlich wie innerhalb des Suspendierbeckens (Kap. 5.1) setzen sich die noch reaktiven Feinstoffe ab und erhärten. Die Ablagerungsneigung kann nur durch ein separates Rührwerk innerhalb des Pumpensumpfes verkleinert werden. Grundsätzlich ist dennoch mit Ablagerungen zu rechnen.

Schon aus den bisherigen Ausführungen zu den Materialströmen sind Interdependenzen zwischen der Anordnung des mechanischen Klassierers und des Suspendierbeckens auf der einen Seite sowie anderen Aspekten (z. B. Hofeinlauf, Restwasser aus dem mechanischen Klassierer) ersichtlich. Gemeinsam mit den noch zu bewertenden Interdependenzen wird diese Problematik zusammenfassend in Kap. 4.2 bewertet. Bezüglich der Ablagerungen lassen sich Entscheidungshilfen angeben (Projektziel 6, S. 79).

3.3.2 Spülwasser

Die Befüllung der Fahrmischer mit Spülwasser (MS_7 in **Bild 7**) wird hinsichtlich der Merkmale Reservekapazität im Suspendierbecken, Auswaschleistung der Klassieranlage und Art der Spülwasserzugabe charakterisiert.

- Das erste Merkmal behandelt das Einbringen von neuem Wasser in den Recyclingkreislauf. Zum einen kann das Spülwasser aus dem Suspendierbecken entnommen werden (MS_{7a}). Zum anderen ist es möglich, eine Entnahme aus dem Reservebecken vorzunehmen (MS_{7b}), wobei neues Wasser in den Recyclingkreislauf eingebracht wird.

Reservebecken sind in der Regel nicht erforderlich. Allerdings werden vor allem die ehemaligen Absetzbecken - aus der Zeit, als es noch kein Restbetonrecycling im heutigen Sinne gab - bei älteren Anlagen gerne als Reservebecken genutzt. Das Reservebecken kann auf mehrere Arten gefüllt werden:

- Oberflächenwasser (um eine Verkomplizierung zu vermeiden, nicht in **Bild 7** dargestellt)
- öffentliches Leitungsnetz (in **Bild 7** dargestellt)
- Brunnen (nicht in **Bild 7** dargestellt).

Das Reservebecken ist also ein Frischwasserbecken.

Durch die Entscheidung, das Spülwasser aus dem Suspendierbecken und/oder aus einem Reservebecken zu entnehmen, wird die in Kap. 5.2.2 beschriebene wasserwirtschaftliche Berechnung der Suspendierbeckengröße beeinflusst. Aus diesem Grund wird dieses Teilkriterium des Materialstromes MS_7 in Kap. 5.2.2 behandelt.

- Das zweite Merkmal bezieht sich auf die optimale Abstimmung des Materialstromes Spülwasser mit der Auswaschleistung der Klassieranlage. Dies bedeutet, dass eine Berechnung vorgenommen werden sollte, wie viele Spülgalgen erforderlich sind, um die Trommelinnenflächen der vorhandenen Fahrmischer in der gewünschten Zeit zu reinigen (vgl. Kap. 4.3.1, Rangierzeiten, Einfüllzeiten...). Die berechnungsmaßgebende Größe hierbei ist die in Kap. 4.3.1 angegebene Spülzeit t_s. Da hierauf unten näher eingegangen wird, kann auf eine weitere Beschreibung an dieser Stelle verzichtet werden.
- Das dritte Entscheidungskriterium betrifft die Spülwasserzugabe in den Fahrmischer. Diese kann automatisiert oder manuell vorgenommen werden. Da sich die Spülsituationen bei der Innenreinigung der Fahrzeuge i.d.R. wiederholen, ist davon auszugehen, dass sich die optimale Spülwassermenge in Abhängigkeit von Füllvolumen und Mischtrommelart nicht ändert und z. B. durch Versuche ermittelt werden kann. Hierbei bietet sich eine automatisierte Spülwasserzugabe an, da es für den Bediener des Spülwassergalgens auf manuelle Art fast unmöglich ist, die optimale Menge an Spülwasser zuzugeben. Entgegen der landläufigen Meinung, dass große Spülwassermengen (3000 l - 4000 l bei 8 m³ Trommelvolumen) benötigt werden, konnte festgestellt werden, dass eher kleine Spülwassermengen (1000 l - 1500 l bei 8 m³ Trommelvolumen) gute Spülergebnisse liefern. Dies hängt offensichtlich mit der bei kleineren Spülwassermengen gegebenen größeren Trübeagitation zusammen. Aufbauend hierauf lassen sich Entscheidungshilfen angeben (Projektziel 13,S. 87).

3.3.3 Weitere Materialströme

Zufluss zur Füllstandsregelung im Suspendierbecken

Ein eventuell erforderliches Nachfüllen des Suspendierbeckens kann zum einen aus dem Reservoir des externen Wassers (Brunnenwasser, öffentliches Leitungsnetz) oder zum anderen aus dem Reservebecken realisiert werden (MS_{8a} und MS_{8b} auf **Bild 7**). Der Fülltiefstand kann z. B. durch die Höhe der Entnahmevorrichtung (Tauchpumpe, Ansaugrohr) oder auch durch entsprechende Automatikschalter fixiert werden. Der Füllhöchststand wird über spezielle Schaltvorrichtungen, z. B. Schwimmerschalter, festgelegt. Die mit diesem Materialstrom in Verbindung stehenden Kriterien und

hierbei insbesondere die Aufteilung des Suspendierraumes in Zonen (vgl. **Bild 33**, S. 56) werden in Kap. 5.2.2 behandelt.

Nicht aufbereitungsfähiges und nicht wiederverwendbares Material

Nicht aufbereitungsfähiges und nicht wiederverwendbares Material muss geordnet entsorgt werden. Da diese Entsorgungssituationen unvermeidbar sind und keine Entscheidungskriterien entwickelt werden können, sollen im folgenden der Vollständigkeit halber lediglich einige allgemeine Anmerkungen gemacht werden. Grundsätzlich sind vier Entscheidungssituationen denkbar:

- überflüssiges Wasser
  Trotz Berücksichtigung der ortsüblichen Regenspende bei der Dimensionierung der Becken kann eine Notableitung erforderlich werden. Hierbei sind die gesetzlichen Vorschriften zu beachten.
- unbrauchbarer Restbeton
  Weiterhin ist es möglich, dass Restbeton nicht recycelt werden kann, vor allem wenn besondere Zusatzmittel (z. B. Leichtbetonzuschlag oder Styropor) oder Zusatzstoffe (z. B. Mörtelzusatzstoffe) verwendet wurden, die die Eigenschaften des Restwassers oder Restbetonzuschlags so verändern würden, dass die Güte des neuen Betons negativ beeinflußt würde. Auch in diesem Falle muss der Restbeton entsorgt werden. Hierbei besteht die Möglichkeit, die unverträglichen Recyclingprodukte getrennt zu lagern, z. B. unterschiedliche Suspendierbecken oder sogar die Verwendung getrennter Recyclinganlagen.
- feste Ablagerungen
  Die dritte Abfallquelle sind die Komponenten der Recyclinganlage, die regelmäßig von Ablagerungen befreit werden müssen. Hier sind insbesondere die Suspendierbecken und der Klassierer betroffen. Durch Fehleinstellungen, Fehldimensionierungen und/ oder Fehlbedienung der Anlagenkomponenten kann es zu verstärkten Ablagerungen im Größenordnungsbereich von einigen Tonnen pro Monat kommen.
- Reststoffe der Abscheider
  Als viertes müssen, wie in **Bild 1** gezeigt, die Reststoffe der Abscheider (z. B. Öle, Fette oder Schwimmstoffe wie Styropor) entsorgt werden.

Stoffe aus dem Vorklassierer

Die Feststoffe aus dem Vorklassierer werden mit einem Radlader beräumt und dem mechanischen Klassierer zugeführt (MS_{10} in **Bild 7**). Hierzu gibt es keine Alternativen, so dass keine Entscheidungskriterien anstehen.

Die flüssigen Stoffe aus dem Vorklassierer werden entweder in das Suspendierbecken (MS_{9a} in **Bild 7**) oder in einen Abscheider (MS_{9b} in **Bild 7**) geleitet. Dies geschieht entweder über ein Gerinne, wenn das Suspendierbecken Unterflur angeordnet ist oder bei Überflur angeordnetem Suspendierbecken über Pumpen. Es sind die Ausführungen im Kap. 6.2 zu beachten.

4. Klassieren der Betonreste in Restbetonzuschlag und Restwasser

In der Recyclingtechnik gehören die Trennverfahren zu den wichtigsten und vielfältigsten Operationen überhaupt, weil sowohl die Recyclingstoffe wie die Zwischenprodukte nur selten in reiner Form vorliegen. In den meisten Fällen handelt es sich um Gemische aus verschiedenen Komponenten mit unterschiedlichen Eigenschaften, welche die Verfahrenstechnik für die Trennung ausnutzt. Das Trennen nach Feinheitsmerkmalen wird im allgemeinen als Klassieren bezeichnet [115]. Beim Klassieren des Restbetons erfolgt eine Trennung in Restbetonzuschlag mit Korngrößen >0,2mm und Feinstoffe <0,2mm, die im Restwasser suspendiert sind.

4.1 Grundlagen der Materialtrennung

Die Materialtrennung wird in zwei Schritten vorgenommen.

- Der Zusammenhalt der Feststoffe im Restbeton wird durch die Adhäsion gebildet. Die hierbei entstehenden Haftkräfte durch Flüssigkeitsbrücken aufgrund der Oberflächenspannung des Anmachwassers werden im ersten Schritt überwunden. Um dies zu erreichen, wird dem Restbeton in der Mischtrommel Spülwasser zugeführt (Restbetontrübe). Der Fahrzeugführer bringt die Mischtrommel auf Einzugsdrehzahl und erhöht damit die Trübeagitation in der Trommel auf ein Maximum. Durch die Flüssigkeitszufuhr sowie das Erzeugen von Reibungskräften zwischen den Feststoffpartikeln in der Restbetontrübe wird die Haftung überwunden, und die Trommelinnenflächen des Fahrmischers werden gereinigt.
- Wenn der Restbeton vollständig in der Restbetontrübe aufgeschlossen wurde, erfolgt der zweite Schritt der Materialtrennung. Die Restbetontrübe wird dem mechanischen Klassierer zugeführt. Der mechanische Klassierer bewirkt, dass das Grobkorn der Restbetontrübe mechanisch aus dem Klassierer ausgetragen wird. Das Feinkorn verlässt den Klassierer mit dem Restwasser.

Dem mechanischen Klassierer, der die Trennung der Klassiertrübe bewirkt, liegt nach Stieß folgendes Prinzip zugrunde: „Durch die Einwirkung konkurrierender Kräfte auf die verschiedenen Komponenten werden diese zu verschiedenen Orten des Trennapparates (**Bild 10**) bevorzugt transportiert und dort entnommen“ [115]. Hierbei wird beim Restbetonrecycling nicht nur nach Korngrößen, sondern auch nach Aggregatzuständen und, wie im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden konnte, auch nach Dichtemerkmalen getrennt.

Der mechanische Klassierer besteht aus einem Aufgabetrichter und einem muldenförmigen Trog. In dem Trog fördert eine mechanische Transportvorrichtung (beim Restbetonrecycling eine Schnecke), die durch einen axial angebauten Elektromotor angetrieben wird, das Grobgut von dem Trogboden zum Austrag. Am Aufgabetrichter befindet sich ein Überlaufwehr, über das das Feingut mit dem Wasser aus dem mechanischen Klassierer fließt.

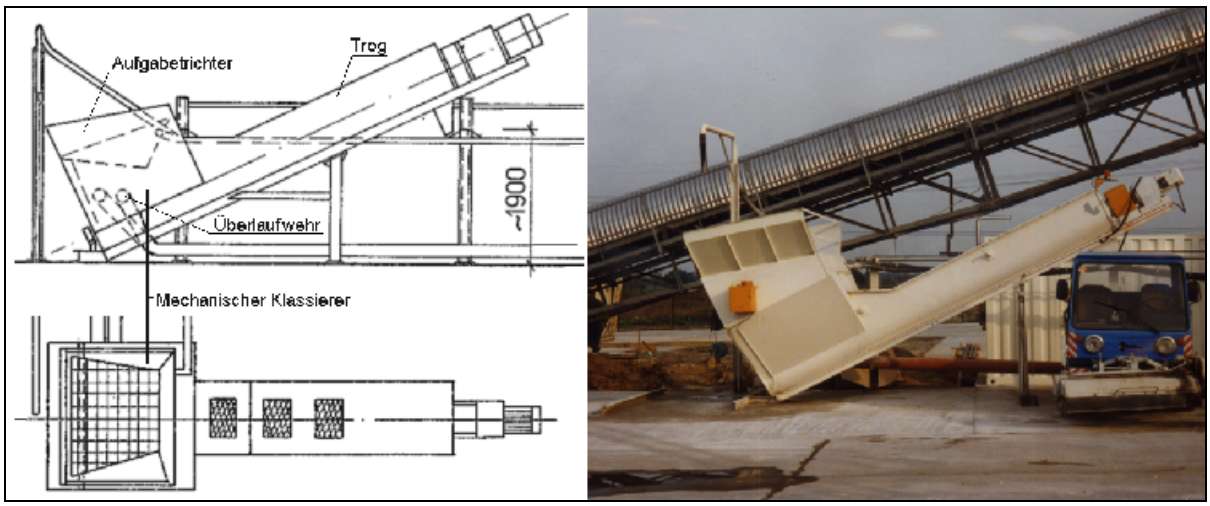


Bild 9 a, b, c: Schneckenklassierer für das Restbetonrecycling in Ansicht und Draufsicht einer installierten Anlage

Die Trennwirkung der mechanischen Klassierer basiert auf dem Anzapfmodell der turbulenten Querstromklassierung (vgl. Schubert [109] S. 258 f.)

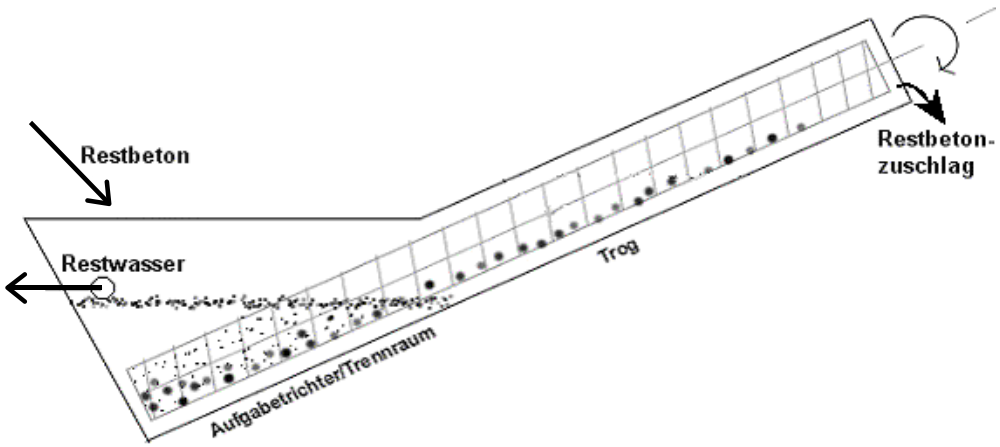


Bild 10: Anzapfmodell der turbulenten Querstromklassierung bezogen auf die Restbeton-klassierung

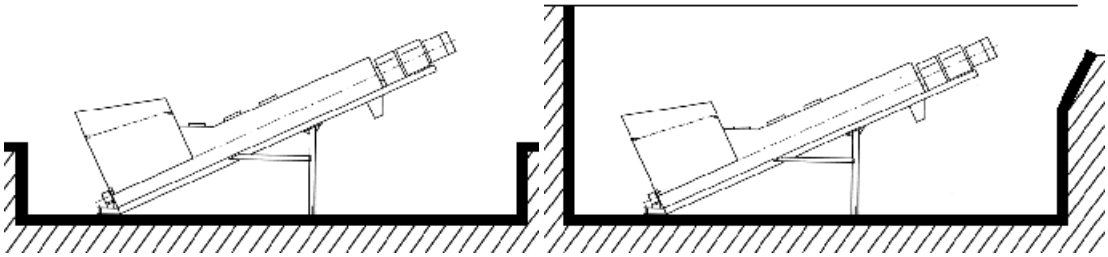
Die Klassiertrübe wird in den Aufgabetrichter, der gleichzeitig den Trennraum darstellt, des mechanischen Klassierers entleert. Dort gelangt sie in den Einflussbereich der Schraube, welche durch ihre Drehbewegung im Aufgabetrichter einen turbulenten Strömungszustand (Trübeagitation) erzeugt. Bei einigen Klassierern wird die Trübeagitation durch zusätzlich angebrachte Armkreuze verstärkt. Durch die senkrecht (quer) zur Förderrichtung wirkende Gravitationskraft setzen sich die gröberen Bestandteile der Restwassertrübe eher im unteren Bereich des Aufgabetrichters ab, während die feineren Bestandteile infolge der intensiven Verwirbelung gleichmäßig verteilt sind. Durch das Überlaufwehr wird demnach der Bereich im Aufgabetrichter angezapft, in dem sich das Feingut befindet. Während durch die Förderbewegung der Schnecke der Bereich des Trennraumes angezapft wird, in dem sich das Grobgut befindet (**Bild 10**). Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen lassen sich hinsichtlich der bau- und maschinentechnischen Kenndaten eines mechanischen Klassierers Entscheidungshilfen entwickeln.

4.2 Bautechnische Kenndaten

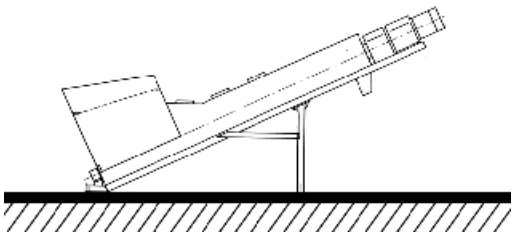
Grundsätzlich ist bei den bautechnischen Kenndaten zwischen der Anordnung im Grundriss und der Anordnung in Bezug zur Geländeoberkante des Betonwerkes zu unterscheiden. Bei der Planung einer Anlage zum Restbetonrecycling stellt sich zunächst die Frage nach dem optimalen Standort der Klassieranlage im Grundriss des Betonwerkes. Dieser ist im wesentlichen unter Beachtung der Standorte der nachgeschalteten Komponenten zu wählen.
Für die Anordnung in Bezug zur Geländeoberkante kann zwischen drei Alternativen gewählt werden. Sie kann Überflur, Teilversenkt oder Unterflur erfolgen.

- Der mechanische Klassierer kann Unterflur angeordnet werden. Dies ist zu empfehlen, wenn beispielsweise die Platzverhältnisse keine andere Möglichkeit zulassen. Hierzu wird ein Tiefbauwerk erstellt, das geeignet ist, den mechanischen Klassierer aufzunehmen (z. B. Hanglage). Da sich bei einer Unterflur-Anordnung das obere Trogende noch unterhalb der Geländeoberkante befindet, muss durch ein nachgeschaltetes Förderband für eine ausreichende Abwurfhöhe zum Aufbau eines ausreichend großen Restbetonzuschlagschüttkegels gesorgt werden. Ferner muss berücksichtigt werden, dass der Arbeitsraum um den mechanischen Klassierer bei einer Unterflur-Anordnung durch den begrenzten Innenraum des Tiefbauwerkes eingeschränkt ist. Ein so eingeschränkter Zugang behindert Wartungs-, Reparatur- und Reinigungsarbeiten. Ein Tiefbauwerk ist weiterhin ein Auffangbecken für Verunreinigungen. Bei Fehlbedienung des mechanischen Klassierers (z. B. zu schnelles Auswaschen) oder bei Ausfall der Pumpe, die ebenfalls gebraucht wird, um das Restwasser in die Suspendierbecken zu pumpen, können sich Recyclingprodukte im Tiefbauwerk sammeln. Zum anderen können relativ leicht exogen verursachte Verunreinigungen, z. B. durch Laub, auftreten.
- Für die Teilversenkt-Anordnung ergeben sich die gleichen Aussagen, wie sie für die Unterflur-Anordnung gelten. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass das Tiefbauwerk kleiner dimensioniert werden und das nachgeschaltete Förderband verkürzt werden kann, da das obere Trogende bereits über die Geländeoberkante hinausragt.
- Bei Überflur-Anordnung des mechanischen Klassierers ist ein Tiefbauwerk nicht erforderlich, so dass alle Bauteile des mechanischen Klassierers leicht zugänglich sind. Ein nachzuschaltendes Förderband entfällt, da das obere Trogende bereits eine ausreichende Abwurfhöhe zum Aufbau eines Schüttkegels aus Restbetonzuschlag besitzt.

Aus den hier genannten Kriterien zur Anordnung des mechanischen Klassieres in der Ansicht lassen sich konkrete Entscheidungshilfen ableiten (Projektziel 5).



a) Teilversenkt b) Unterflur



c) Überflur

Bild 11: Anordnung des mechanischen Klassierers in Bezug zur Geländeoberkante

4.3 Verfahrenstechnische Kenndaten

4.3.1 Durchsätze

Die Ermittlung des relevanten Durchsatzes kann auf der Grundlage empirischer Beziehungen oder durch Experimente ermittelt werden. Neben Korrekturfaktoren ist die Qualität des Recyclingproduktes Restbetonzuschlag zu berücksichtigen.

Theoretischer Förderdurchsatz $\dot{M}_{theo}$ und theoretischer Volumendurchsatz $\dot{V}_{theo}$ (empirisch aus Schubert)

Trotz teilweise anderslautender Bezeichnungen in den Verkaufsprospekten wird durch die Anbieter von Auswaschschnecken in der Regel lediglich der Förderdurchsatz angegeben. Aufgrund der sehr heterogenen und sich stetig im Wandel befindlichen Marktsituation bei den Auswaschschneckenanbietern wird auf einen Marktüberblick verzichtet. Für den Feinstoff – Feststoffmassedurchsatz $\dot{M}_{FSRW}$ (Feinstoffe im Restwasser) und den Grobgut-Feststoffmassedurchsatz $\dot{M}_{RBZ}$ (Restbetonzuschlag ohne Eigenfeuchte) wurden folgende empirische Beziehungen für den Förderdurchsatz an einem nicht näher beschriebenen Stoffsystem im kontinuierlichen Betrieb ermittelt (aus Schubert [109]).

$$\dot{M}_{RBZ} = 5{,}45 N_S D_S^3 n_S k_\gamma k_\beta$$ in [t Zuschlag/h] **(Gl. 3)**
(modifiziert nach Schubert [109] S. 272)

$$\dot{M}_{FSRW} = 4{,}55 N_S D_S^{1{,}765} k_d k_\gamma k_\beta k_D$$ in [t Feinstoff/h] **(Gl. 4)**
(modifiziert nach Schubert [109] S.274)

N_s	Anzahl der Schrauben
D_s	Schraubendurchmesser in [m]
k_d, k_γ, $k_ß$, k_D	Korrekturfaktoren (aus Schubert [109])

n_s Schraubendrehzahl in [min^{-1}]

Für die Anwendung der Gleichungen auf einen handelsüblichen Klassierer (**Bild 9**) werden folgende Werte zugrunde gelegt:

- $N_s = 1$, $D_s = 0{,}5$ m , $n_s = 17$ min^{-1}
- Korrekturfaktoren
  - k_d: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Korngrößenzusammensetzung des Klassierer-überlaufs.

    $k_d \tilde{} \; 1{,}2$ (Durch Interpolation)
  - $k\gamma$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Feststoffdichte.

    $k_\gamma = \frac{\gamma}{2700} = \frac{3000}{2700} = 1{,}1$
  - $k_ß$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Trogneigung

    $k_ß = 0{,}79$ (Durch Extrapolation)
  - k_D: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der angestrebten Trübeverdünnung im Überlauf

    $k_D = 1{,}1$ (Mittelwert)
- $\dot{M}_{RBZ} = 5{,}45 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}5^3 \cdot 17 \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}79 = 10{,}0$ t/h (RBZ)
- $\dot{M}_{FSRW} = 4{,}55 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}5^{1{,}765} \cdot 1{,}2 \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}79 \cdot 1{,}1 = 1{,}5$ t/h (FSRW)

Bei diesem Zahlenbeispiel werden 11,5 t/h trockener Feststoff gefördert. Bei einem durchschnittlichen Feststoffgehalt von 2,1 t/ m^3 bis 2,2 t/ m^3 im Frischbeton ergibt sich umgerechnet ein theoretischer Volumendurchsatz von $\dot{V}_{theo} = 5{,}2\,m^3/h$ - $5{,}5\,m^3/h$.

Experimentell ermittelter Klassierdurchsatz im kontinuierlichen Betrieb $\dot{V}_{RB,kon}$

Für das Auswaschen von 0,5 m³ Restbeton wurden bei der weiter unten beschriebenen Versuchsreihe durchschnittlich 390 sec benötigt. Die Zeitnahme erfolgte jeweils vom Beginn bis zum Ende des Auswurfes am oberen Ende des Troges des mechanischen Klassierers. Der experimentell ermittelte Volumendurchsatz $\dot{V}_{RB,kon}$ des oben berechneten Klassierers beträgt demnach:

$\dot{V}_{RB,kon} = 0{,}5\,m^3 \cdot \frac{3600\ s}{390\ s\ h} = 4{,}6\,m^3/h$ (Mittelwert aus **Tabelle 6**, S.39)

Dieser Zahlenwert ist der experimentell ermittelte kontinuierliche Volumendurchsatz des Klassierers bei 0,5 m³ Restbetonchargen.

Experimentell ermittelter Klassierdurchsatz im diskontinuierlichen Betrieb $\dot{V}_{RB,dis}$

Bei dem Entleeren der Restbetontrübe aus dem Fahrmischer in den Aufgabetrichter des mechanischen Klassierers handelt es sich um einen diskontinuierlichen Prozess, da einzelne Fahrzeuge entleert werden. Der Klassiervorgang selbst ist ein kontinuierlicher Vorgang, der je nach organisatorischem Ablauf unterbrochen werden kann. Um vor diesem Hintergrund den Volumendurchsatz für Restbeton $\dot{V}_{RB,dis}$ ermitteln zu können, müssen noch einige zeitliche Aspekte ergänzt werden.

- Zeitfaktor für das Leerfahren des Materialbettes t_{MB}

Unter der Voraussetzung, dass bei einem Fahrzeugwechsel das Materialbett im Trog des Klassierers leergefahren wird, beträgt die Zeitspanne vom Einfüllen der Restbetontrübe bis zum Beginn des sichtbaren Auswerfens von Material t_{MB}. Diese Zeitspanne kann experimentell ermittelt werden.

- Fahrzeugspezifischer Zeitfaktor t_{FZ}

  Zur Ermittlung der Auswaschdurchsatz muss die Förderzeit, wenn der Klassierer nicht aktiv genutzt werden kann, abgemindert werden. Hierzu zählen:

  - die Entleerzeit t_E[min]: Diese Zeit wird benötigt, um die Klassierertrübe in den Aufgabetrichter zu entleeren.
  - die Rangierzeit t_R[min]: Diese Zeit wird beim Fahrzeugwechsel beansprucht.
  - die Einfüllzeit t_F[min]: Diese Zeit wird für das Aufnehmen des Spülwassers benötigt
  - die Spülzeit t_s[min]: Diese Zeit wird benötigt, um die Feinstoffe in der Klassiertrübe vollständig aufzuschließen.

In Abhängigkeit vom jeweiligen Verhältnis dieser beiden Zeitfaktoren ergeben sich unterschiedliche Volumendurchsätze. Maßgeblich hierbei ist allerdings der fahrzeugspezifische Zeitfaktor t_{FZ}. Grundsätzlich gilt: je reibungsloser das gleichmäßige Beschicken des mechanischen Klassierers mit Restbetontrübe funktioniert, desto größer wird der Klassierdurchsatz für Restbeton.

Dieser Sachverhalt ist in **Bild 12** dargestellt. Für den Fall, dass t_{FZ} größer als t_{MB} ist, ergeben sich zwischen den zu recycelnden Restbetontrübechargen größere zeitlich Abstände. Mit kleiner werdendem t_{FZ} verringern sich diese Abstände, bis es zu Überschneidungen der zu recycelnden Restbetontrübechargen im mechanischen Klassierer kommt, wenn t_{FZ} kleiner als t_{MB} wird.

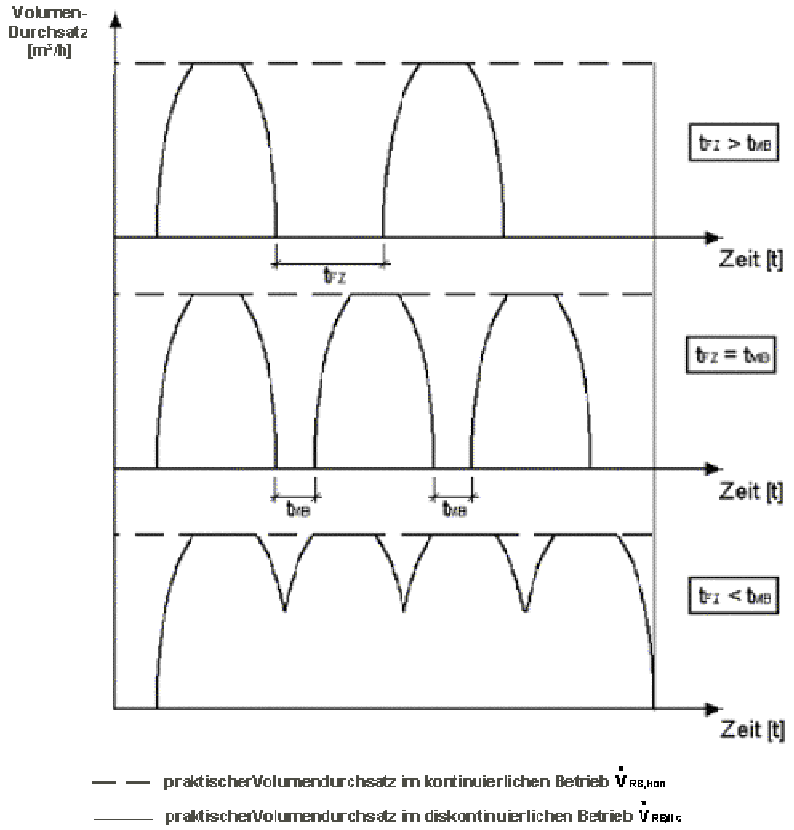


Bild 12: Volumendurchsätze des mechanischen Klassierers

Erforderlicher Auswaschdurchsatz $\dot{V}_{Soll}$

Die erforderliche Auswaschdurchsatz $\dot{V}_{Soll}$ ist eine Vorgabe der Entscheidungsperson. Sie wird aufgrund des persönlichen Präferenzmusters sowie der im betreffenden Betonwerk herrschenden Rahmenbedingungen ermittelt. Folgende Aspekte können Einfluss auf die erforderliche Auswaschdurchsatz nehmen:

- Restbeton
  - Anzahl der zu reinigenden Maschinen und Geräte,
  - Bestellverhalten der Kunden (z. B. Fuhrpark in engem Zeitfenster zurück),
  - Platzverhältnisse auf dem Werksgelände für das Rangieren,
  - Abnahmeverhalten der Kunden (z. B. viele Restmengen),
- Rückbeton
  - Marktstruktur (ländlich oder städtisch),
  - Interne Organisation (z. B. Fehllieferungen),
  - Verfügbarkeit von Frachtraum.

Bei einer Jahresproduktion von 40.000 m^3 und durchschnittlich 3% Betonresten ergibt sich ein durchschnittlicher Auswaschdurchsatz von ca. 5,4 m^3 pro Arbeitstag. Dieser arithmetische Durchschnittswert steht allerdings nicht in Bezug zur Realität. In Einzelfällen müssen größere Mengen Frischbeton (20 m^3 – 30 m^3) in möglichst kurzer Zeit aus den Fahrzeugen entfernt werden.

Auswaschdurchsatz unter Berücksichtigung der Qualität

Bei diesen Betrachtungen ist nicht berücksichtigt, ob das Ausnutzen des Förderdurchsatzes möglicherweise zu einer Beeinträchtigung des Auswaschergebnisses führt. Von Praktikern wird berichtet, dass ein zu schnelles Auswaschen das Auswaschergebnis verschlechtert und das insbesondere im Restbetonzuschlag ein zu hoher Anteil an Feinstoffen vorliegt, der zu Erhärtungserscheinungen führen kann. Hierdurch würde der Restbetonzuschlag unbrauchbar.
Aufbauend hierauf lassen sich konkrete Entscheidungshilfen geben (Projektziel 8).

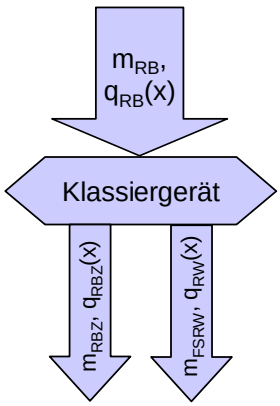
4.3.2 Güte der Klassierung

Eine ideal scharfe Klassierung, bei der alle Teilchen, die größer als eine bestimmte Trennkorngröße x_t sind, in die Klasse Restbetonzuschlag und alle Teilchen, die kleiner als eine bestimmte Trennkorngröße x_t sind, in die Klasse Feinkorn im Restwasser gelangen, ist technisch nicht erreichbar. Im Restbetonzuschlag sind jedoch Teilchen $x < x_t$ schädlich, da es sich bei diesem Fehlkorn teilweise um noch reaktive Zementpartikel handelt, die bei fortschreitender Hydratation eine Kornbindung im Restbetonzuschlag erzeugen können.
Für den Anwender des Restbetonrecyclings stellt der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton mit der “Richtlinie für Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel” einen Leitfaden für die Umsetzung in die Praxis bereit. Unter anderem wird in dieser Richtlinie verlangt: “Der Restbetonzuschlag muss soweit ausgewaschen sein, dass keine Kornbindung auftritt und gleichmäßiges Untermischen möglich ist”. Wie im Rahmen der Arbeit gezeigt wird, ist für die Beurteilung der Kornbindung der Gehalt an Fehlkorn < 0,125 mm maßgebend. Allerdings existieren für

mechanische Klassierer weder Angaben über Trennkorngröße noch über Fehlkorngehalte oder Masseausbringen.

4.3.2.1 Theoretische Grundlagen

Für die Kennzeichnung der Klassierung gelten in Anlehnung an Stieß [115] folgende Begriffe und Definitionen:



m_{RB} : Feststoffmasse der Restbetontrübe
$q_{RB}(x)$: Verteilungsdichte des RB an der Korngröße x
m_{RBZ} : Feststoffmasse des Restbetonzuschlags
$q_{RBZ}(x)$: Verteilungsdichte des RBZ an der Korngröße x
m_{FSRW} : Feststoffmasse der Feinstoffe im Restwasser
$q_{FSRW}(x)$: Verteilungsdichte der Feinstoffe im RW an der Korngröße x

Bild 13: Stoffströme beim Klassieren

- Gesamtbilanz (Feststoff)

$m_{RB} = m_{RBZ} + m_{FSRW}$ (**Gl. 5**)

$rbz = m_{RBZ} / m_{RB}$ => RBZ – Masseausbringen (**Gl. 6**)

$fsrw = m_{RW} / m_{RB}$ => RW – Masseausbringen (**Gl. 7**)

- Fraktionsbilanz (Feststoff)

$$q_{RB}(x) = rbz \cdot q_{RBZ}(x) + rw \cdot q_{RW}(x) \quad \textbf{(Gl. 8)}$$

mit rbz = 1-rw und rw =1-rbz folgt

$$rbz = \frac{q_{RB}(x) - q_{FSRW}(x)}{q_{RBZ}(x) - q_{FSRW}(x)} \quad \text{und} \quad \textbf{(Gl. 9)}$$

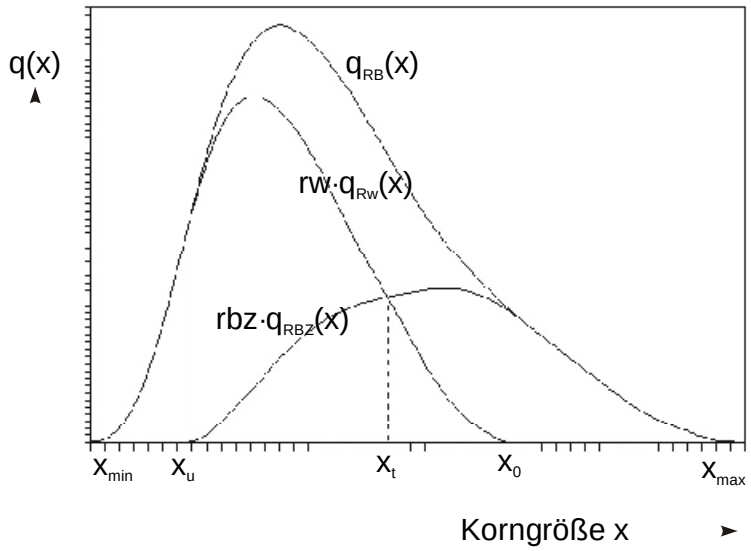
$$rw = \frac{q_{RB}(x) - q_{RBZ}(x)}{q_{FSRW}(x) - q_{RBZ}(x)} \quad \textbf{(Gl. 10)}$$

Da es sich bei technischen Klassierungen nicht um ideal scharfe Klassierungen handelt, benutzt man den Trenngrad T(x), um anzugeben, welcher Anteil einer Restbeton-Korngröße im Restbetonzuschlag enthalten ist. Der Trenngrad ergibt sich aus den Verteilungsdichtefunktionen von Restbetonzuschlag und den Feinstoffen im Restwasser sowie dem Masseausbringen.

$$T(x) = rbz \cdot \frac{q_{RBZ}(x)}{q_{RB}(x)}$$ modifiziert nach Stieß [115] (S. 260) **(Gl. 11)**

Zur Veranschaulichung kann der als Trenngradkurve berechnete Verlauf des Trenngrades über der Partikelgröße graphisch dargestellt werden. Aus der Auftragung von $q_{RB}(x)$ und $rbz \cdot q_{RBZ}(x)$ lässt sich die Trenngradkurve punktweise bestimmen. Es ergeben sich folgende Eigenschaften der Trenngradkurve:

- Unterhalb von x_u hat sie den Wert Null.
- Oberhalb von x_o hat sie den Wert Eins.
- Die Trennkorngröße x_t befindet sich bei T(x) = 0,5,
  d.h. bei rbz $q_{RBZ}(x)$ = rw $q_{RW}(x)$.



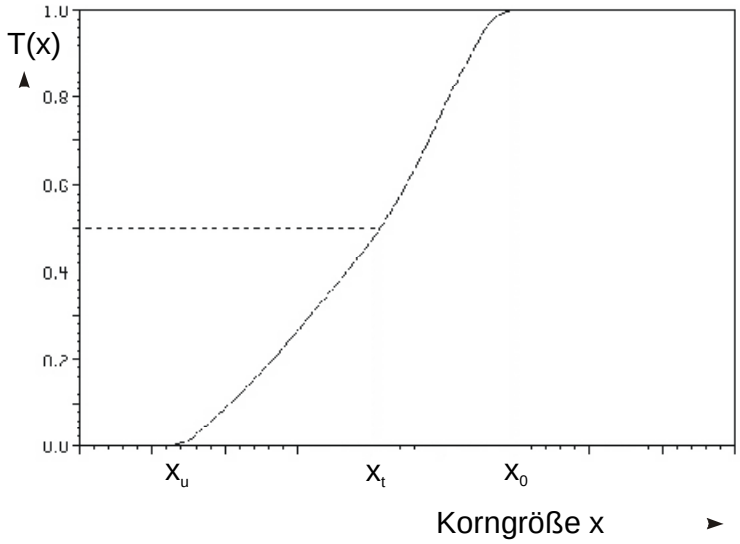


Bild 14: a) grafische Darstellung der Fraktionsbilanz (modifiziert nach Stieß [115] S. 260)
b) Trenngradkurve (modifiziert nach Stieß [115] S. 260)

Für die praktische Berechnung der Trenngradkurve benötigt man entweder zwei der drei Verteilungsfunktionen und das Masseausbringen oder alle drei Verteilungsfunktionen, da das Masseausbringen auch mit Hilfe der Gleichungen **(Gl. 9)** und **(Gl. 10)** berechnet werden kann.
Darüber hinaus kann die Trenngradkurve durch stetige Funktionen rechnergestützt approximiert werden. Hierbei benutzt man die modifizierte Plitt-Funktion [80].

Fehlaustrag im Restbetonzuschlag F_{RBZ} wird im allgemeinen der Mengenanteil genannt, der kleinere Teilchen als x_t enthält und dennoch auf der Restbetonzuschlagsseite erscheint. Da zum

überwiegenden Teil Zementpartikel kleiner als 125µm sind, wird in Abänderung hierzu im Rahmen dieser Arbeit der Restbetonzuschlag-Fehlanteil F_{RBZ} gemäß **(Gl. 12)** definiert:

$$F_{RBZ} = \int_{x_u}^{125\mu m} q_{RBZ}(x)dx \qquad \textbf{(Gl. 12)}$$

Der Grenzwert 125µm orientiert sich an den Normvorgaben der Zementhersteller.

4.3.2.2 Experimentelle Untersuchungen zur Klassiergüte

Wie bereits erwähnt, fehlen bisher jegliche Angaben über Trennkorngröße und Fehlkorngehalte für mechanische Klassierer, die für das Restbetonrecycling verwendet werden. Das im folgenden beschriebene Versuchsprogramm hat zum einen die Zielstellung, erstmals grundsätzliche Aussagen über das Trennverhalten des mechanischen Klassierers bezüglich der nachfolgenden Parameter machen zu können:

- Entleer- und Klassierdurchsätze,
- Masseausbringen,
- Korngrößenverteilung,
- Trennverhalten anhand von Trennkorngröße, Trenngradverlauf und Fehlkorngehalten.

Zum anderen wurden aus praktischen Erfahrungen im Umgang mit Restbetonrecyclinganlagen Hinweise geliefert, dass offensichtlich der Fehlkornanteil im Restbetonzuschlag in Abhängigkeit zum Entleerdurchsatz der Restbetontrübe aus dem Fahrmischer in den Aufgabetrichter des mechanischen Klassierers steht. Es wurde von den Betreibern die Vermutung aufgestellt, dass möglicherweise mit größer werdendem Entleerdurchsatz der Fehlkornanteil im Restbetonzuschlag steigt. Die zweite Zielstellung des Versuchsprogramms ist, spezifische Aussagen über den Einfluss des Entleerdurchsatzes auf die Klassiergüte machen zu können und gegebenenfalls kritische Entleerdurchsätze anzugeben.

Zum Erreichen der Versuchsziele wurde im Rahmen von Feldversuchen ein Probenahmeprogramm zur Gewinnung von Restbeton-, Restbetonzuschlag- und Restwasserproben durchgeführt. Mit diesen Proben wurde das Trennverhalten des mechanischen Klassierers untersucht. Zur Berechnung der Trenngradkurve des mechanischen Klassierers und damit der Beurteilung der Trennkorngröße ist die Kenntnis der Korngrößenverteilungen der Feststoffe im Restbeton, im Restbetonzuschlag und im Restwasser erforderlich. Mit Hilfe der Kornverteilungen bei Verwendung von unterschiedlichen Entleerdurchsätzen wurden die Trennkorngrößen sowie der Restbetonzuschlag-Fehlanteil ermittelt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen können konkrete Aussagen über die Abhängigkeit des Restbetonzuschlag-Fehlanteils vom Entleerdurchsatz sowie über kritische Entleerdurchsätze gemacht werden. Hierbei führten Wiederholungsmessungen zu reproduzierbaren Ergebnissen.

Versuchsanlagen und –geräte

Die im folgenden beschriebenen Anlagen und Geräte dienten für die Versuchsdauer ausschließlich dem Versuchszweck und waren für weitere Produktionen gesperrt worden.

- Recyclinganlage

  Die Auswaschversuche wurden an der Restbetonrecyclinganlage in Ludwigsfelde durchgeführt. Die Anlage ist auf den Bildern **Bild 2** und **Bild 3** dargestellt. Sie verfügt über einen Überflur angeordneten mechanischen Klassierer, der folgende maschinentechnische Merkmale aufweist:

Durchmesser des Troges	: 650 mm
Schneckendurchmesser	: 500 mm
Schneckenlänge	: 5500 mm
Ganghöhe	: 290 mm
Schneckendrehzahl	: 17 min^{-1}
Trogneigung	: 25°
Höhe des Überlaufwehres	: 1200 mm
Aufgabetrichterbreite	: 2025 mm
Aufgabetrichtertiefe	: 1950 mm

- stationäre Mischanlage

  Die Versuchsmischungen wurden in einer Horizontalmischanlage mit vollautomatischer Steuerung hergestellt. Die verwogenenen IST-Mengen konnten auf einem Lieferschein ausgedruckt werden. Die Mischanlage besteht aus einem Einwellenzwangsmischer mit Doppelwendel, der eine hohe Durchmischung des Versuchsbetons sicherstellt sowie aus den dazugehörigen Verwiege- und Lagereinrichtungen. Das eingesetzte Bedienpersonal verfügten über langjährige Erfahrung.

- Fahrmischer

  Bei dem Fahrmischer, der zur Aufnahme des Probe-Restbetons und der Herstellung der Restbetontrübe diente, handelt es sich um ein handelsübliches Fahrzeug bestehend aus einem 4-Achs-Fahrgestell und einer 8-m^3-Trommel. Der eingesetzte Fahrzeugführer verfügte über langjährige Erfahrung.

- Radlader

  Der Radlader diente zum Auffangen des Restbetonzuschlags. Die Masse des Restbetonzuschlags konnte auf diese Weise mit einer Fahrzeugwaage bestimmt werden. Die Masse des Radladers betrug für die Dauer der Versuche 12.700 kg.

Versuchsablauf

Der Versuchsablauf diente der Trenngradbestimmung. Hierzu mußten zunächst die Kornverteilungskurven des Restbetons, der Feinstoffe im Restwasser und des Restbetonzuschlags bestimmt werden. Aufgrund der großen Bandbreite der Kornverteilung von 0,04 µm bis 32 mm wurden Teilkornverteilungen mit zwei unterschiedlichen Analyseverfahren ermittelt und später zu einer Gesamtkornverteilungskurve zusammengesetzt.

In umfangreichen Messreihen wurden Voruntersuchungen zur Analysenmethodik durchgeführt. Hierbei wurde die Erkenntnis gewonnen, dass die Genauigkeit der Probenahme zentrale Bedeutung für die Aussagekraft der Versuchsergebnisse hat. Bereits kleine Fehler bei der Probenahme (z. B. zu geringe Homogenisierung, Unachtsamkeit, beginnende Hydratation), die zu geringen Abweichungen in der Kornverteilung führen, können den Verlauf der Trenngradkurve wesentlich beeinflussen. Zur Vermeidung von Probenahmefehlern wurde aus diesem Grund im Rahmen der Feldversuche mit detaillierten Arbeitsanweisungen gearbeitet. Vor der Durchführung der Versuche wurde der mechanische Klassierer mit der Versuchsbetonsorte beschickt, um keine Durchmischungen mit vorher recycelten Restbetontrüben zu riskieren. Folgende Schritte im Versuchsablauf sind durchgeführt worden:

- 1. Schritt

  Die Produktion einer Betonmenge von 0,5 m³ incl. ZTVK-Lieferscheinausdruck und anschließender Befüllung eines Fahrmischers. Für die Durchführung der Versuche wurde eine einheitliche Betonrezeptur gewählt:

  B 25 KR

0/2	: 681 kg/m³
2/8	: 331 kg/m³
8/16	: 826 kg/m³
CEM I 32,5 R	: 280 kg/m³
EFA-Füller	: 50 kg/m³
Wasser	: 175 l/m³
BV	: 0,84 kg/m³

  Die Eigenfeuchten und die Kornverteilungen der Gesteinskörnungen sind vor Versuchsdurchführung ermittelt worden.

- 2. Schritt

  Die Probenahme zur Ermittlung der Korngrößenverteilung der Feststoffe im Restbeton ist in **Bild 15** dargestellt. Die Probe wurde in zwei Teile geteilt. Die erste Probe diente der Ermittlung und Kontrolle des Wassergehaltes im Frischbeton. Die zweite Probe wurde über dem Prüfsieb 250 µm ausgewaschen. Die Masse der Probe wurde vor dem Auswaschen ermittelt. Der Rückstand sowie der Durchgang wurden aufgefangen. Der Rückstand wurde getrocknet, und mit Hilfe einer Siebanalyse wurde die Kornverteilung bestimmt. Der Wassergehalt der in einer Wanne aufgefangenen Suspension mit dem Kornanteil < 250µm wurde durch Sedimentieren des Feststoffes und Dekantieren des überstehenden Wassers eingeengt, die eingeengte Suspension homogenisiert und die Probe für die Korngrößenanalyse entnommen. Die daraus gewonnene Teilprobe wurde unverzüglich auf –2°C abgekühlt. Mit Hilfe einer Dichtemessung des dekantierten Wassers konnte sichergestellt werden, dass keine Feststoffe abgeschöpft wurden. Die Messung der Korngrößenverteilung für den Anteil < 250 µm des Restbetonzuschlages erfolgte ebenso wie die Korngrößenverteilung des Restbetons und die Korngrößenverteilung der Feinstoffe im Restwasser mit dem Laserbeugungsmessgerät Coulter LS 230.

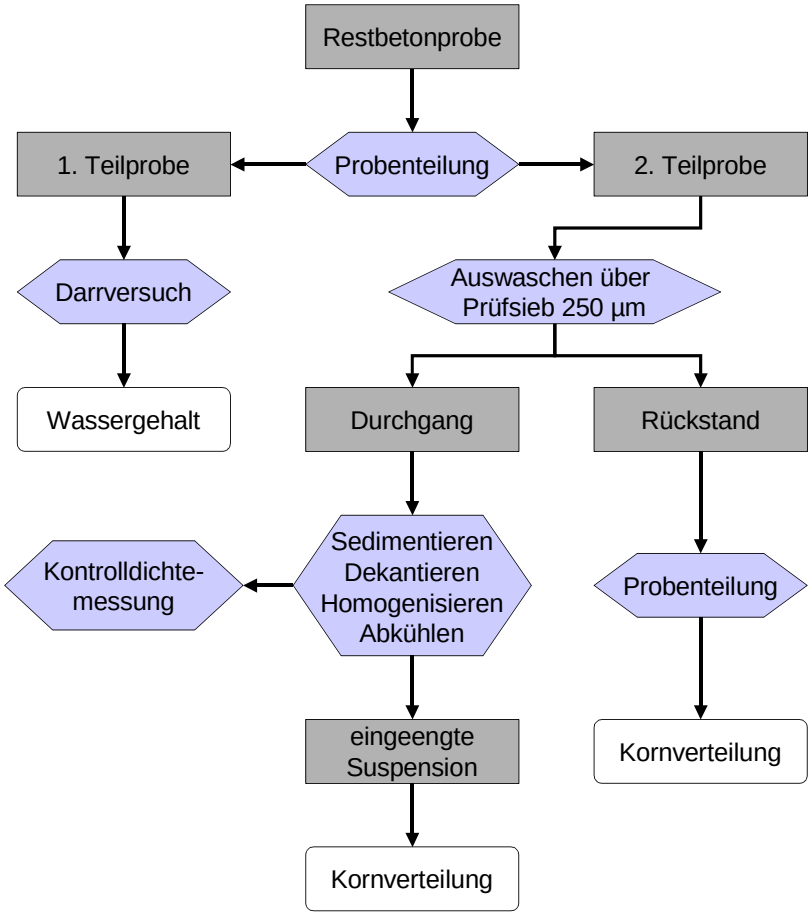


Bild 15: Probenahme zur Bestimmung der Korngrößenverteilung der Feststoffe im Restbeton

- 3. Schritt

  Als nächstes wurde die Restbetontrübe hergestellt. Der produzierte Beton wurde mit einer definierten Menge an Spülwasser (hier: Frischwasser) versehen.

- 4. Schritt

  Nachdem die Restbetontrübe im Fahrmischer möglichst optimal homogenisiert wurde, begann das Entleeren der Restbetontrübe in den Aufgabetrichter des mechanischen Klassierers.

  Der Entleerdurchsatz wurde manuell gesteuert. Um den zeitlichen Ablauf des Versuches beschreiben zu können, wurden die Zeiträume: “Beginn Entladung” bis “Ende Entladung” sowie “Beginn Auswurf” bis “Ende Auswurf” ermittelt. Zur nachträglichen Verifizierung der Zeitpunkte “Beginn Auswurf” und “Ende Auswurf” wurde von den Versuchen eine Videoaufzeichnung durchgeführt.

- 5. Schritt

  Während des Auswaschversuches wurde aus dem, dem Überlaufwehr nachgeschalteten, offenen Gerinne kontinuierlich Restwasser für die Restwasserprobe entnommen. Das Restwasser wurde in einer Wanne aufgefangen und nach dem Versuch mit Hilfe eines starken Rührers homogenisiert. Die hieraus gewonnene Teilprobe wurde ebenfalls unverzüglich auf –2°C abgekühlt. Auch die Kornverteilung der Feinstoffe im Restwasser wurde mit Hilfe eines Laserbeugungsmessgerätes bestimmt.

- 6. Schritt

  Die Probenahme zur Ermittlung der Kornverteilung des Restbetonzuschlags wurde zuletzt durchgeführt. Während des Auswaschversuches wurde der Restbetonzuschlag in einer Radladerschaufel aufgefangen. Mit Hilfe einer Fahrzeugwaage wurde die Masse des Restbetonzuschlags bestimmt. Danach wurde aus der Mitte des Haufwerks eine Probe entnommen. Diese Probe wurde behandelt wie die Restbetonprobe im 2. Schritt.

Versuchsprogramm

Aufgrund des erheblichen personellen und maschinentechnischen Aufwandes zur Herstellung der Proben war die Anzahl der Versuche auf zwölf begrenzt.

- variable Versuchsparameter

  Gemäß der Zielsetzung der Versuche ist der Entleerdurchsatz variiert worden. Unterstützend ist bei vier Versuchen der Spülwassergehalt herabgesetzt worden, um in kürzerer Zeit dem Klassierer mehr Feststoffe zuführen zu können. Nur so konnten - in der Praxis auftretende - Extremsituationen nachgestellt werden. Entsprechend schwankt auch der Feinstoffgehalt in der Trübe. Der Entleerdurchsatz kann manuell mit Hilfe der Entleerdrehzahl der Fahrmischertrommel variiert werden. Obwohl das Entleeren durch einen sehr erfahrenen Fahrmischerfahrer durchgeführt wurde, ist dieses Verfahren mit Ungenauigkeiten behaftet. Trotzdem wurde versucht, das Trennverhalten bei Entleerdurchsätzen zwischen 5,0 kg/s und 100,0 kg/s zu ermitteln, so dass sich das in **Tabelle 2** dargestellte Versuchsprogramm ergab.

Tabelle 2: Sollwerte für die Variation des Entleerdurchsatzes bei den Auswaschversuchen

Versuch-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Entleerdurchsatz nass [t/h]	18	49	80,3	111,2	142,2	173,5	204,5	235,4	266,8	297,7	329	360

  Hierbei ist ein Entleerdurchsatz von ca. 18,0 t/h der technisch niedrigste und von ca. 360,0 t/h der technisch höchste machbare Entleerdurchsatz. Die zwischen den Versuchs-Nr. 1 und Nr. 12 dargestellten Entleerdurchsätze ergaben sich rein arithmetisch in $^{95}/_{11}$-Schritten. Für die Feldversuche (manuelle Entleerung) sollte hiermit ein grober Fahrplan vorgegeben werden.

- konstante Versuchsparameter:
  - Außentemperatur
  - Ausgangsrohstoffe
  - Anlageneinstellungen
  - Versuchsbeton
  - Versuchsdurchführende

4.3.2.3 Ergebnisse der experimentellen Untersuchung

Durchsätze

Die erzielten Entleerdurchsätze während der Feldversuche sind in **Tabelle 3** dargestellt. Zwar wird deutlich, dass die arithmetisch bei der Versuchsplanung ermittelten Soll-Entleerdurchsätze aufgrund der manuellen Entleerung nicht in allen Bereichen exakt erreicht wurden. Allerdings wurde zwischen beiden Entleerdurchsatz-Reihen mit r=0,98 ein hoher Regressionskoeffizient erzielt. Damit kann von einer guten Abdeckung des Entleerdurchsatz-Versuchsbereichs ausgegangen werden. Zu Versuch Nr. 12 muss angemerkt werden, dass mit einem Entleerdurchsatz von 105,4 kg/s die Aufnahmekapazität des mechanischen Klassierers überschritten wurde und ein Teil der Klassiertrübe nicht in den Aufgabetrichter gelangte. Die Ergebnisse für diesen Versuch konnten nicht verwandt werden.

Tabelle 3: Entleerdurchsätze

Versuch-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Soll-Entleerdurchsatz nass [t/h]	18,0	49,0	80,3	111,2	142,2	173,5	204,5	235,4	266,8	297,7	329,0	360,0
Ls-Nr.	10554	10553	9911	10552	9922	10551	9919	10550	9915	9913	9917	10549
Ist-Entleerdurchsatz nass [t/h]	19,4	32,4	59,0	65,2	68,0	180,4	184,7	207,0	258,8	264,6	312,8	379,4

Die den Restbeton betreffenden Messparameter während der Feldversuche sind in **Tabelle 4** zusammengefasst. Die Trockenmasse in der Restbeton-Trübe konnte anhand der gemessenen Zuschlageigenfeuchten und der auf dem Lieferschein angedruckten Einwaagen ermittelt werden. Auf dem gleichen Wege wurde der Wassergehalt in der Restbeton-Trübe ermittelt. Durch die bei den Versuchen 8, 9, 11 und 12 vorgenommene Reduktion des Wassergehaltes in der RB-Trübe sollte der Entleerdurchsatz trocken erhöht werden. Wie sich gezeigt hat, blieb dies allerdings ohne Einfluss auf die Versuchsergebnisse. Aus Kontrollgründen wurde der Wassergehalt im Restbeton zusätzlich durch Darren ermittelt.

Tabelle 4: Messwerte der Restbetontrübe während der Feldversuche

Versuch-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Trockenmasse RB [kg]	1115,1	1144,3	1299,0	1133,9	1287,0	1107,5	1244,0	1134,3	1263,0	1268,0	1265,0	1223,2
Wassergehalt RB Darren [%]	7,0	8,0	4,8	7,8	7,6	7,8	7,0	7,2	6,6	5,8	6,0	7,0
Wassergehalt RB-Trübe [kg]	588,9	581,7	587,0	585,1	583,0	594,5	602,0	417,7	248,0	570,0	474,0	52,8
Wasseranteil RB-Trübe [%]	34,5	33,7	31,1	34,0	31,2	34,9	32,6	26,9	16,4	31,0	27,3	17,1
Feuchtmasse RB-Trübe [kg]	1704,0	1726,0	1886,0	1719,0	1870,0	1702,0	1846,0	1552,0	1511,0	1838,0	1739,0	1476,0

Die den Restbetonzuschlag betreffenden Messparameter während der Feldversuche sind in **Tabelle 5** zusammengefasst. Die Feuchtmasse des Restbetonzuschlags wurde durch Auffangen in einer Radladerschaufel und anschließendem Wiegen auf einer Fuhrwerkswaage bestimmt. Durch die Ermittlung der Eigenfeuchte konnte die Trockenmasse im Restbetonzuschlag ermittelt werden.

Tabelle 5: Messwerte beim Restbetonzuschlag während der Feldversuche

Versuch-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Feuchtmasse RBZ [kg]	1020	980	1120	920	1080	940	1080	1000	920	960	900	(-)
Wassergehalt RBZ-Darren [%]	6,6	5,6	5,0	5,4	8,2	5,8	7,5	6,4	7,1	6,2	6,4	(-)
Trockenmasse RBZ [kg]	953	925	1064	870	991	885	999	936	855	901	843	(-)

Während der Feldversuche wurde die Entleerzeit der Restbeton-Trübe aus dem Fahrmischer gemessen. Hieraus konnte unter Verwendung der Masse der Restbetontrübe der Entleerdurchsatz bestimmt werden. In gleicher Weise wurde die Durchlaufzeit der Trübe durch den Klassierer bestimmt, um den Klassiererdurchsatz näherungsweise bestimmen zu können. Die Messung der Durchlaufzeit wurde begonnen, als die ersten nennenswerten Restbetonzuschlagsmengen ausgeworfen wurden, und die Messung endete, als der Auswurf des Restbetonzuschlags weitestgehend beendet war. Die Videoaufnahmen bestätigen die gemessenen Zeitpunkte.

Tabelle 6: Entleer- und Durchlaufzeiten und daraus berechnete Durchsätze

Versuch-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Entleerzeit [s]	315	192	115	95	99	34	36	27	21	25	20	14
Durchlaufzeit [s]	455	425	485	378	410	393	340	411	345	335	340	(-)
Entleerdurchsatz trocken [t/h]	12,7	21,5	40,6	42,9	46,8	117,3	124,4	151,2	216,5	182,6	227,7	314,5
Entleerdurchsatz nass [t/h]	19,5	32,4	59,0	65,1	68,0	180,2	184,6	206,9	259,0	264,7	313,0	379,5
Klassierdurchsatz trocken [t/h]	7,5	7,8	7,9	8,3	8,7	8,1	10,6	8,2	9,5	9,7	8,9	(-)
Klassierdurchsatz nass [t/h]	13,5	14,6	13,8	16,4	16,4	15,6	19,5	13,6	15,8	19,8	18,4	(-)

Die Werte aus **Tabelle 6** verdeutlichen stark unterschiedliche Durchsätze für Entleerung und Klassierung bezogen auf die Trockenmasse. In **Bild 16** sind die Entleer- und Klassierdurchsätze aufgetragen. Generell lässt sich sagen, dass die Klassierdurchsätze mit größer werdendem Entleerdurchsatz steigen. Es ist von einem relativ starken Anstieg (gestrichelter Bereich) bis in den Bereich des Klassierdurchsatzes 7,2 – 8,6 t/h auszugehen. Danach wird die Kurve sehr viel flacher und nähert sich asymptotisch einem Grenzwert bei ca. 9,4 t/h an. Die Ursache für diese beträchtlichen Unterschiede zwischen beiden Durchsätzen ist in der Pufferwirkung des mechanischen Klassierers zu sehen. Die in

den Aufgabetrichter gelangende Klassiertrübe verbleibt zunächst im Trennraum (vgl. **Bild 10**) und wird danach kontinuierlich durch die Schraube weggefördert. Bei der Versuchsreihe schwankte die Verweildauer der Feststoffe im Klassierer zwischen ca. 60 s (Zeitpunkt: Beginn Entladung bis Zeitpunkt: Beginn Auswurf) und ca. 485 s (Durchlaufzeit).

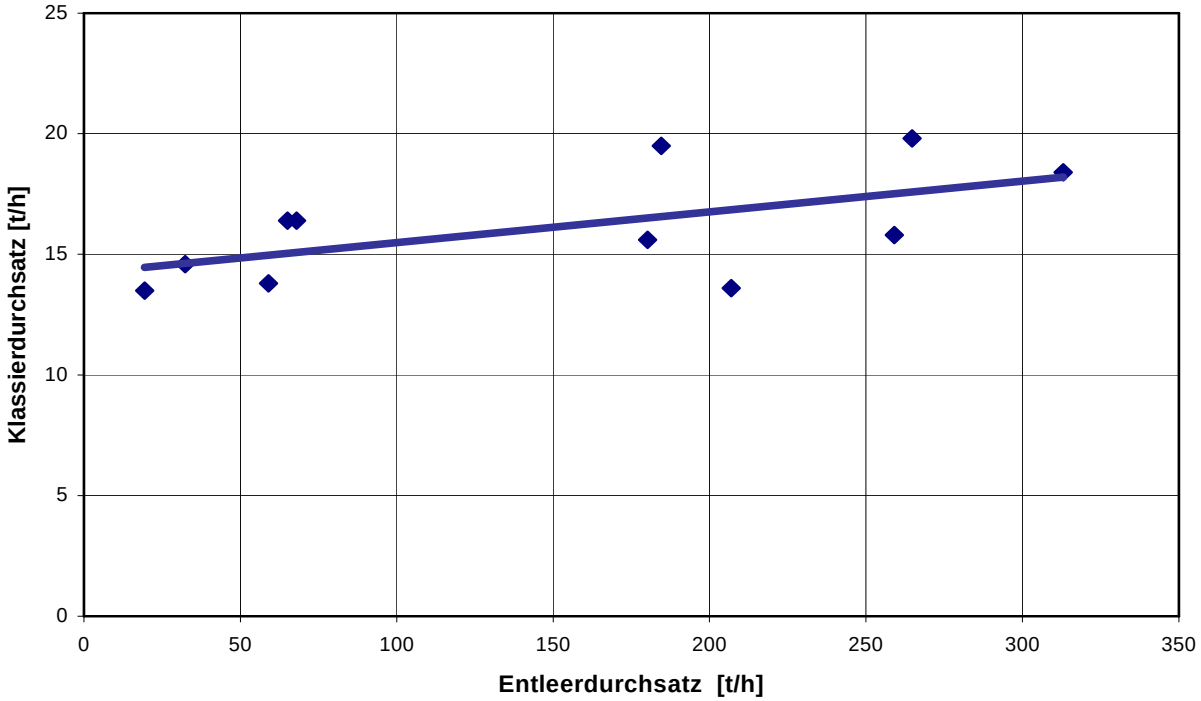


Bild 16: Zusammenhang zwischen Entleerdurchsatz und Klassierdurchsatz

Massenausbringen

Aus den Trockenmassen der aufgegebenen Restbetontrübe und des ausgetragenen Restbetonzuschlags wurde das Massenausbringen rbz berechnet (**Tabelle 7**). Das Massenausbringen fsrw ergibt sich als Differenz zum Betrag eins, da die Trockenmasse der Feststoffe im Restwasser nicht bekannt ist.

Tabelle 7: Massenausbringen

Versuch-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
rbz	0,855	0,808	0,819	0,767	0,770	0,799	0,803	0,825	0,677	0,710	0,666	(-)
fsrw	0,145	0,192	0,181	0,233	0,230	0,201	0,197	0,175	0,323	0,290	0,334	(-)

In **Bild 17** ist das Massenausbringen rbz in Abhängigkeit vom Entleerdurchsatz nass und vom Klassierdurchsatz nass aufgetragen.

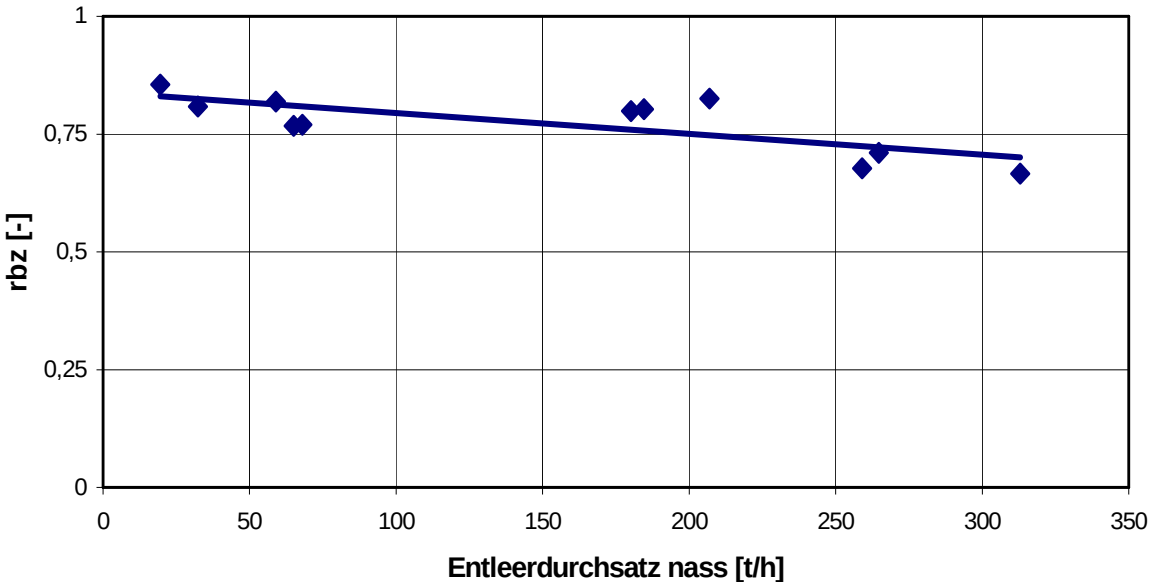


Bild 17: Zusammenhang zwischen Masseausbringen rbz und Entleerdurchsatz nass

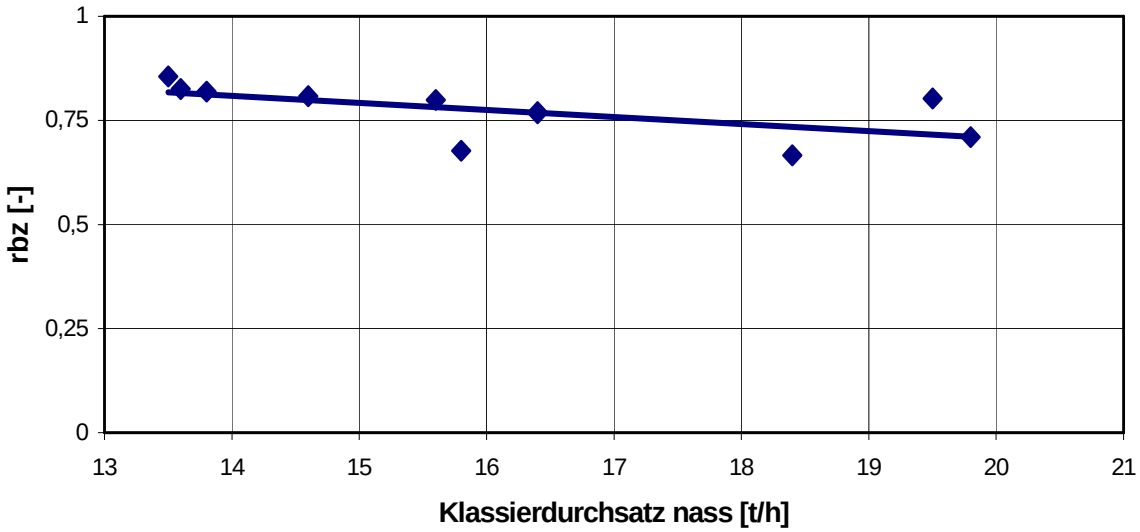


Bild 18: Zusammenhang zwischen Masseausbringen rbz und Klassierdurchsatz nass

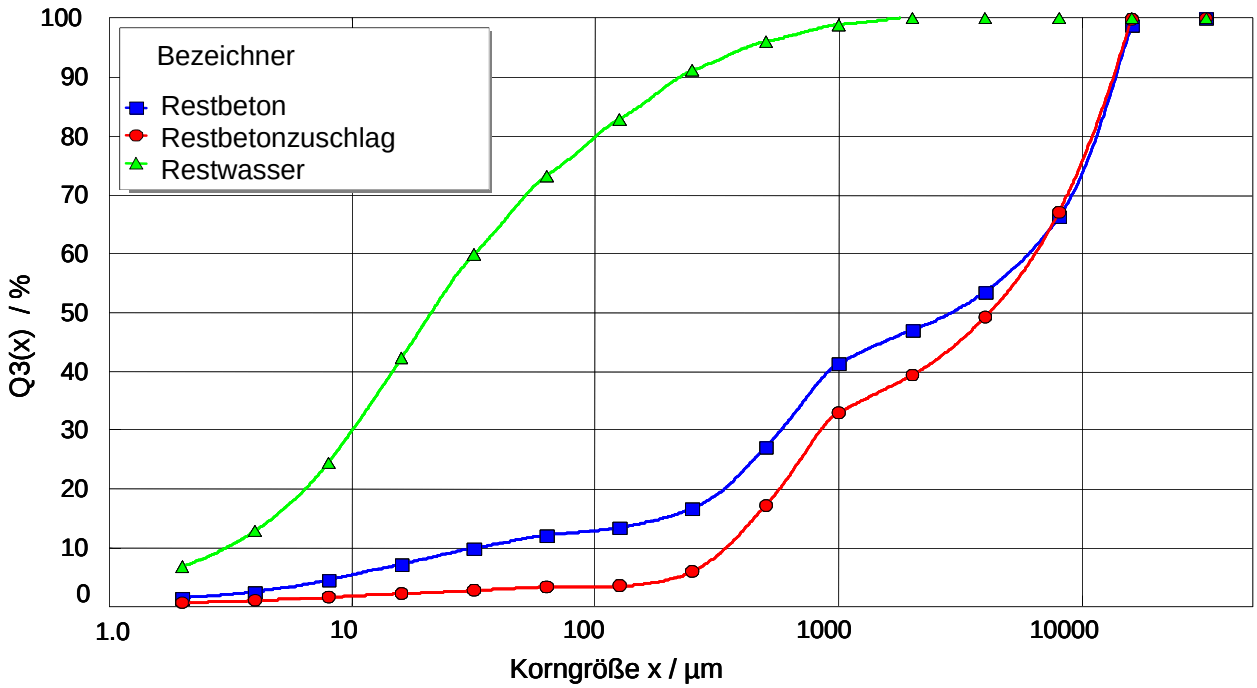
Der Vergleich zwischen Klassier- und Entleerdurchsatz zeigt, dass das Massenausbringen rbz stärker vom Klassierdurchsatz beeinflusst wird. Die Ursache hierfür ist in dem sogenannten toten Fluss zu sehen, der bei steigenden Entleerdurchsätzen in Form eines Überlaufeffektes ein vermehrtes Grobgutausbringen im Restwasser bewirkt.

Hierbei und auch bei den nachfolgenden Auswertungen hat sich generell gezeigt, dass Effekte grundsätzlich bei Zugrundelegung der nassen Durchsätze mit größerer Signifikanz zu beobachten waren als bei Verwendung von trockenen Durchsätzen. Die Ursache hierfür ist, dass nicht messbare Einflussgrößen wie Trübeagitation und Feinstoffkonzentration in die nassen Durchsätze indirekt mit eingehen. Zum Nachweis eines signifikanten statistischen Zusammenhanges ergibt sich für 11 Freiheitsgrade ein Mindestkorrelationskoeffizient von $| r_{soll} |$ = 0,6. Für den in **Bild 17** dargestellten Zusammenhang ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von $| r_{Bild\ 17} |$ = 0,59 und für den in **Bild 18** dargestellten Zusammenhang ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von $| r_{Bild\ 18} |$ = 0,74.

Korngrößenverteilungen

Aus den Messergebnissen der Laserbeugung und der Siebanalyse wurde für die jeweilige Probe die Gesamtkorngrößenverteilung berechnet. Diese Berechnung erfolgte mit Hilfe der Software PMP-Compact [71]. Als Grundlage für die Berechnung wurde eine geometrische Klasseneinteilung gewählt. Wegen der breiten Verteilung wurde die Normzahlenreihe R10/3 verwendet, mit der bereits die Siebanalyse durchgeführt wurde. Die Ergebnisse der Laserbeugungsanalyse mussten auf diese Kornklassen umgerechnet werden. Da für die spätere Berechnung der Trenngradkurven gleiche Klasseneinteilung für alle Produkte erforderlich ist, wurden auch die Ergebnisse des Restwassers auf die Normzahlenreihe R10/3 umgerechnet.

Die Ergebnisse der Korngrößenverteilungen und ausgewählte charakteristische Korngrößenkennwerte sind in den Tabellen der Anlage zusammengestellt. Exemplarisch ist eine Korngrößenverteilung in **Bild** 19 dargestellt. Die Zunahme in der Feinheit von Restbetonzuschlag über den Restbeton hin zum Feinkorn im Restwasser ist deutlich zu erkennen.



Entleerdurchsatz: 216,5 t/h, Klassierdurchsatz: 9,5 t/h

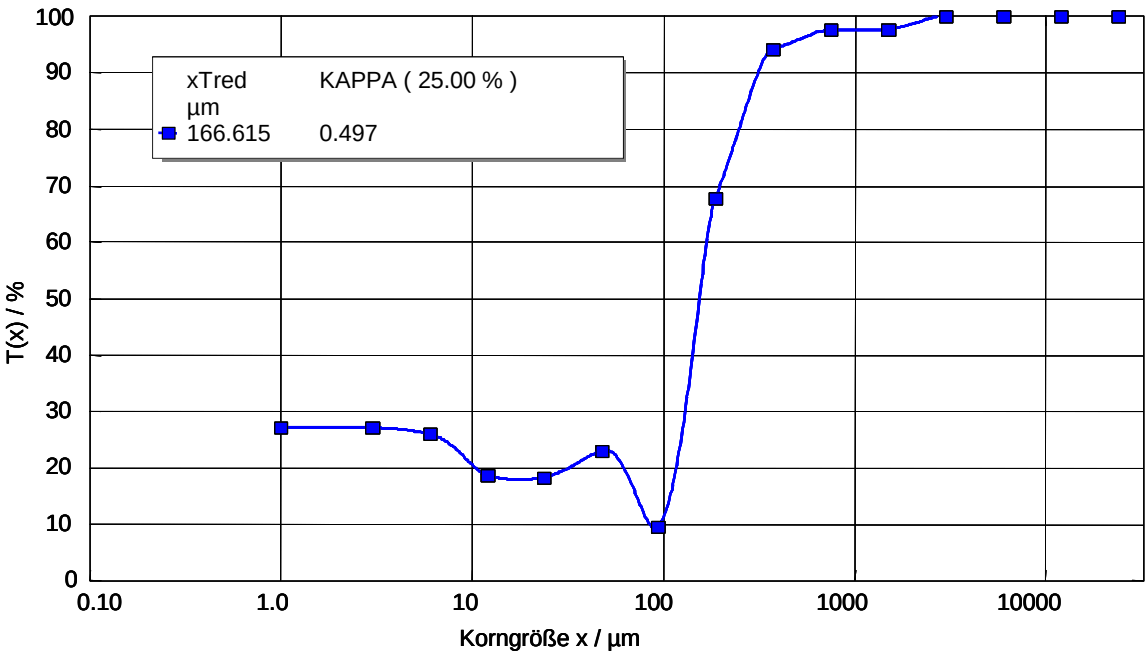
Bild 19: Korngrößenverteilung von Restbeton, Restbetonzuschlag und Restwasser

Die Kornverteilung der Feinstoffe im Restwasser lässt sehr deutlich erkennen, dass ca. 80 % der Partikel im Korngrößenbereich des Mehlkorns ($x \leq 0{,}125$ mm) anzutreffen sind. Etwa 20% der Partikel sind dem Korngrößenbereich des Feinsandes ($0{,}125$ mm $\leq x \leq 0{,}25$ mm) zuzuordnen. An der Kornverteilung des Restbetonzuschlages ist zu erkennen, dass sich ca. 3 % der Partikel im Korngrößenbereich $x \leq 0{,}125$ mm befinden. Hierbei handelt es sich um Fehlkorn, das im Restbetonzuschlag verfestigend wirken kann. Die Kornverteilung des Restbetons setzt sich aus den Kornverteilungen des Restbetonzuschlags und den Feinstoffen im Restwasser zusammen. Der Unterschied zwischen der Kornverteilung des Restbetons und der Korngrößenverteilung des Restbetonzuschlags belegt anschaulich den mit dem Klassierer erreichten Trenneffekt.

Trennverhalten

Aus den Kornverteilungen konnte der Verlauf der Trenngradkurve ermittlet werden. Exemplarisch ist der Verlauf einer Trenngradkurve in **Bild 20** dargestellt.

Zur Ermittlung der Trenngradkurven müssen die Teilungszahlen bzw. Trenngrade für jede Kornklasse berechnet werden. Die Teilungszahl ist definiert als das Verhältnis der Menge einer bestimmten Kornklasse im Grobgut (Restbetonzuschlag) zur Menge in der gleichen Kornklasse im Aufgabegut (Restbeton). Zur Berechnung der Trenngrade wurden die Korngrößenverteilungen von Restbeton, Restbetonzuschlag und der Feinstoffe im Restwasser verwendet. Die benötigten Mengenausbringen konnten daraus über eine Bilanzrechnung mit der PMP-Compact-Software ermittelt werden [71]. Dabei muss die Summe der Mengen von RBZ und RW in einer Kornklasse die Menge des Restbetons in dieser Kornklasse ergeben. Auf der Grundlage der bilanzierten Mengenausbringen und den gemessenen Korngrößenverteilungen konnten dann wiederum mit PMP-Compact die Trenngradkurven und die Trennkorngröße ermittelt werden. Die Ergebnisse sind für die einzelnen Versuchsserien ebenfalls im Anhang zusammengefasst.



Entleerdurchsatz: 216,5 t/h, Klassierdurchsatz: 9,5t/h

Bild 20: Trenngradverlauf

Der Verlauf der Trenngradkurve zeigt, dass im Grobkornbereich ein vollständiger Übergang des aufgegebenen Restbetons in den ausgewaschenen Restbetonzuschlag erfolgt. Im Feinkornbereich wird dagegen keine völlge Trennung erreicht. Vielmehr sind bei einer Korngröße von ca. 100 µm noch 10 % des Restbetons im Restbetonzuschlag enthalten. Bei Korngrößen unter 100 µm steigt der Trenngrad im Unterschied zu der in **Bild 14** dargestellten hypothetischen Trenngradkurve wieder an. Dieser Effekt ist von verschiedenen Sicht- und Klassierprozessen bekannt und wird durch den toten Fluss verursacht.

Die Versuchsergebnisse hinsichtlich der Partikelmerkmale KG-Anteil < 125 µm in Restbetonzuschlag, Trennkorngröße und KG-Anteil > 125 µm im Restwasser sind in **Tabelle 8** zusammengefasst.

Tabelle 8: Partikelmerkmale

Versuch-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
KG-Anteil < 125 µm im RBZ [%]	1,65	3,11	2,92	2,48	3,61	2,11	3,24	1,38	3,65	4,27	4,12	(-)
Trennkorngröße [µm]	129,2	153,5	168,0	152,9	228,3	125,8	159,0	132,3	167,0	204,7	250,0	(-)
KG-Anteil > 125µm im RW [in %]	3,04	9,94	8,97	9,96	4,63	3,52	16,59	6,61	17,25	24,80	22,19	(-)

Einige Partikelmerkmale sind in **Bild 21** ... **Bild 24** als Funktion des Klassierdurchsatzes nass sowie des Entleerdurchsatzes nass dargestellt.

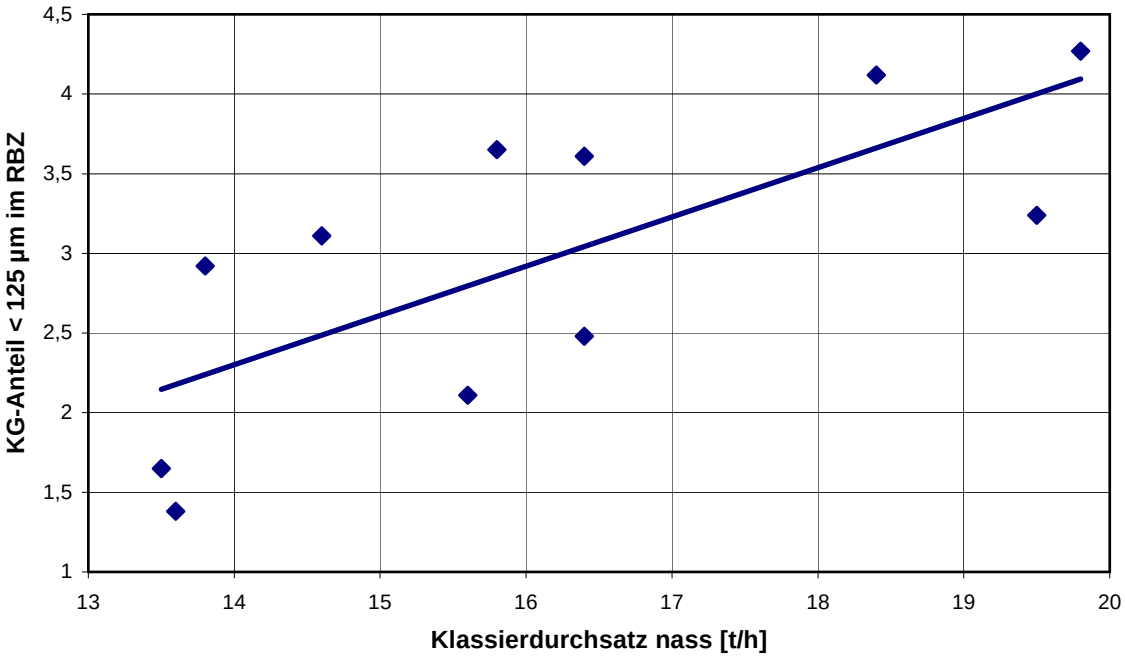


Bild 21: Zusammenhang zwischen dem nassen Klassierdurchsatz und dem KG-Anteil < 125 µm im Restbetonzuschlag

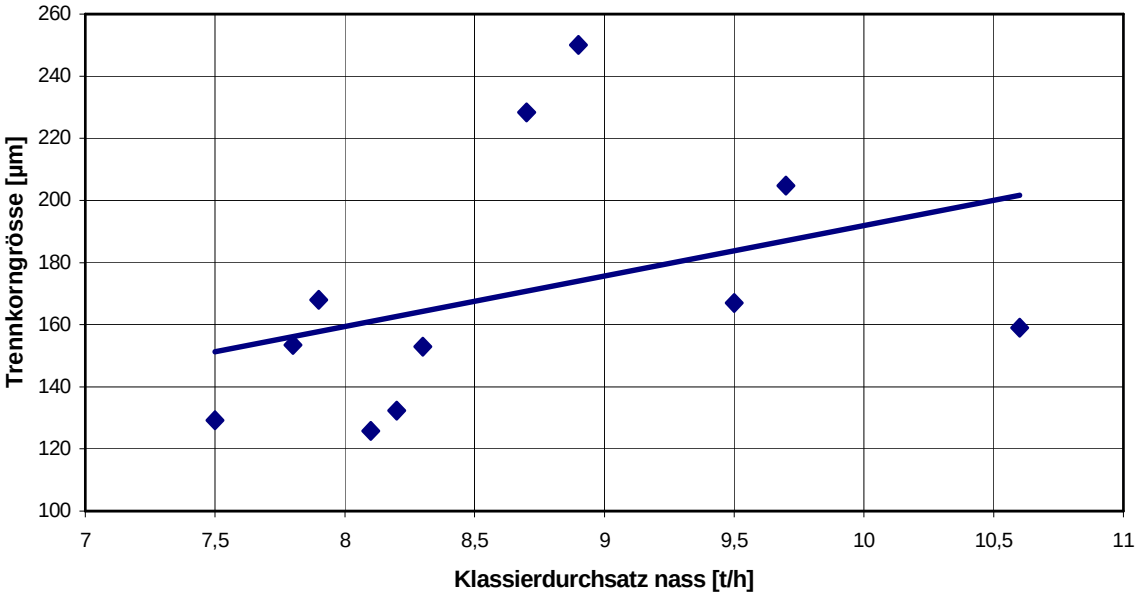


Bild 22: Zusammenhang zwischen dem nassen Klassierdurchsatz und der Trennkorngröße

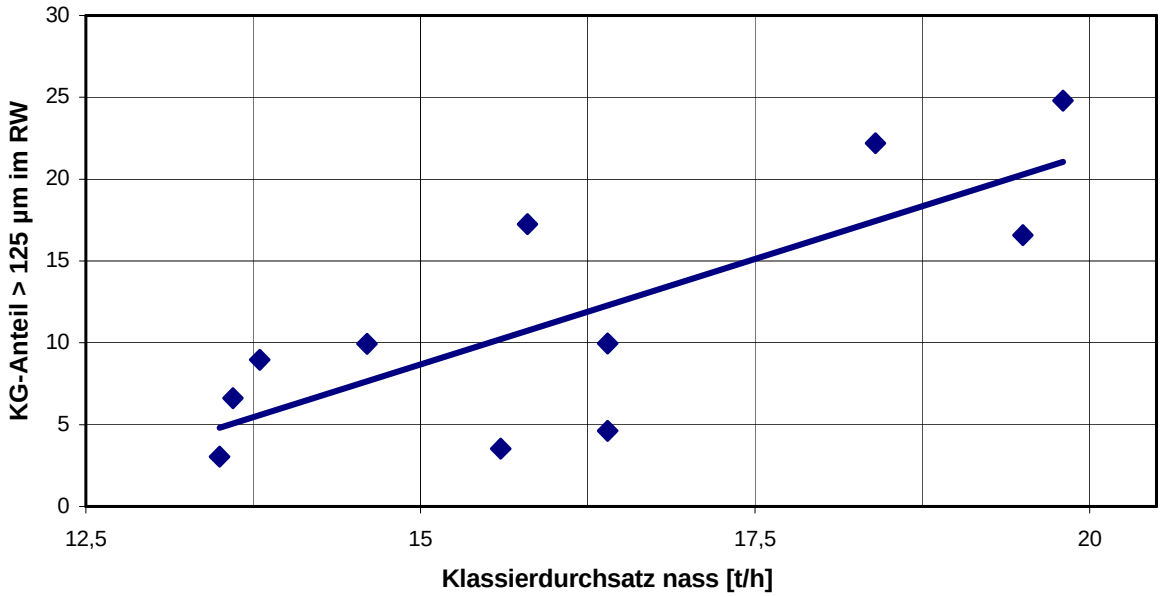


Bild 23: Zusammenhang zwischen dem KG-Anteil > 125 µm im Restwasser und dem Klassierdurchsatz

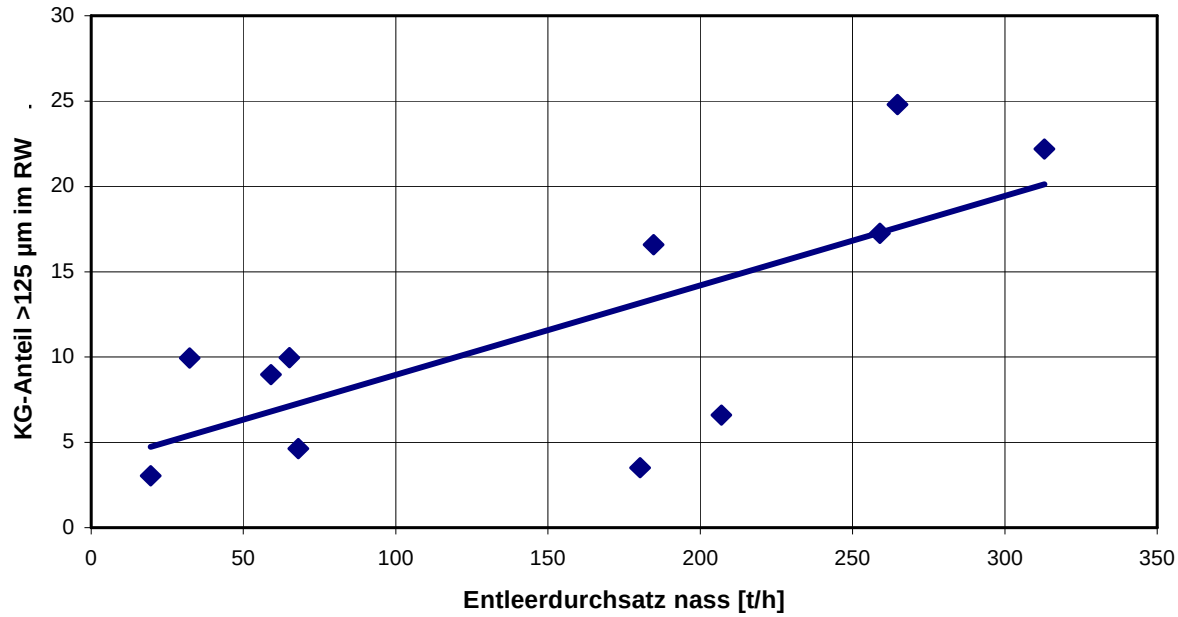


Bild 24: Zusammenhang zwischen dem KG-Anteil > 125 µm im Restwasser und dem Entleerdurchsatz

Die berechneten Korrelationskoeffizienten erlauben mit $| r_{Bild\ 21} | = 0{,}73$, $| r_{Bild\ 22} | = 0{,}58$, $| r_{Bild\ 23} | = 0{,}78$ und $| r_{Bild\ 24} | = 0{,}73$ den Nachweis eines signifikanten statistischen Zusammenhangs.

Die folgenden Effekte können beschrieben werden:

- Der Fehlkornanteil < 125 µm im Restbetonzuschlag steigt ebenfalls mit „nassem“ Klassierdurchsatz an.
- Die Trennkorngröße steigt mit zunehmendem Klassierdurchsatz an. Diese Tendenz ist allerdings nur bei Betrachtung des „nassen“ Klassierdurchsatzes signifikant erkennbar. Bei Betrachtung des

„trockenen“ Durchsatzes ergibt sich keine Abhängigkeit. Die Ursache hierfür ist, dass in den „nassen“ Durchsatz Prozesse wie Trübeagitation und Feinkornkonzentration indirekt eingehen.

- Im Unterschied dazu bestehen für den Fehlkornanteil > 125 µm im Restwasser signifikante Abhängigkeiten zu Entleer- und Klassierdurchsätzen. Ursache ist der bereits beschriebene tote Fluß.

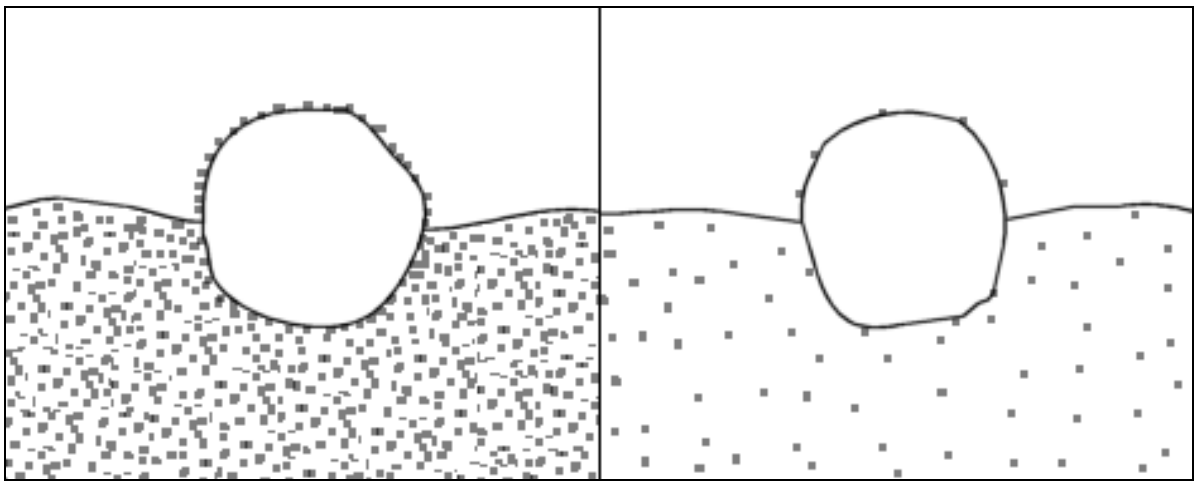
Gemeinsam mit diesen Effekten können aus dem bisherigen Ausführungen zusammenfassend folgende Versuchsergebnisse festgehalten werden:

- Die Klassierdurchsätze steigen mit größer werdendem Entleerdurchsatz. Aufgrund der Pufferwirkung des mechanischen Klassierers, bei der die diskontinuierlich in den Aufgabetrichter gefüllte Restbetontrübe (Entleeren) in einem kontinuierlichem Prozess (Klassieren) durch den Trog gefördert wird, nähert sich der Klassierdurchsatz asymptotisch einem Grenzwert an.
- Das Masseausbringen rbz wird signifikant vom Klassierdurchsatz und weniger vom Entleerdurchsatz beeinflusst.
- Die Korngrößenverteilungen Restbeton, Restbetonzuschlag und Restwasser belegen anschaulich den erreichten Trenneffekt.

Einfluss des Entleerdurchsatzes

Anwender von Restbetonrecyclinganlagen berichten übereinstimmend von einem Zusammenhang zwischen Entleerdurchsatz und Kornbindung im Restbetonzuschlag. Je schneller die Restbetontrübe in den Aufgabetrichter entleert wird, desto größer soll die Wahrscheinlichkeit sein, dass sich eine Kornbindungserscheinung zeigt. Durch Kornbindung wird der Restbetonzuschlag unbrauchbar und blockiert im schlimmsten Fall je nach Art der Lagerung den Produktionsprozess. Auf der Basis der Versuchsergebnisse kann ein Zusammenhang zwischen Entleerdurchsatz und Kornbindung im Restbetonzuschlag nicht eindeutig verifiziert werden. Es wurde zwar eine Abhängigkeit zwischen Entleerdurchsatz und Klassierdurchsatz sowie zwischen Klassierdurchsatz und Fehlkornanteil >125 µm im Restbetonzuschlag gefunden. Allerdings korrelieren die Messwerte von Entleerdurchsatz und Fehlkornanteil nur mittelmäßig stark, so dass von einem eindeutigen Zusammenhang bisher noch nicht ausgegangen werden kann.

Um den Vorgängen im Trennraum gerecht zu werden, sind offensichtlich weitere Einflussparameter zu berücksichtigen. In **Bild 25** ist ein Restbetonzuschlagkorn dargestellt, welches gerade durch die Förderbewegung der Schnecke aus dem Trennraum herausbewegt wird.



a) Restbetonzuschlagkorn mit hohem Fehlkornanteil

b) Restbetonzuschlagkorn mit niedrigem Fehlkornanteil

Bild 25: Modellvorstellung zum Fehlkorngehalt im Restbetonzuschlag

Je höher die Feinkornkonzentration in der Restbetontrübe ist, desto mehr Fehlanteile bleiben am Zuschlagskorn haften. So müssen sich nach Meinung des Autors weitergehende Überlegungen zur Ursachenforschung hinsichtlich der Kornbindungserscheinungen im Restbetonzuschlag auf die Einflussgrößen der Feinkornkonzentration der Restbetontrübe im Trennraum richten.

Kritischer Fehlkorngehalt

Um den Einfluss des Fehlkorngehaltes auf die Kornbindung im Restbetonzuschlag zu ermitteln, wurden im Labor Vergleichsuntersuchungen durchgeführt. Es wurden sieben Restbetonzuschlagproben mit folgender Zusammensetzung nachgebildet (die Rohstoffe entsprachen den Rohstoffen bei den Feldversuchen):

Tabelle 9: Zusammensetzung der Proben

Probe-Nr.	Zuschlag trocken [kg]	Zement [kg]	Zementanteil [%]	Wasser [l]
1	48,5	1,5	3	2,5
2	49,0	1,0	2,0	2,5
3	49,5	0,5	1,0	2,5
4	49,6	0,4	0,8	2,5
5	49,7	0,3	0,6	2,5
6	49,8	0,2	0,4	2,5
7	49,9	0,1	0,2	2,5

Bei den drei ersten Proben konnte bereits nach einem Tag unter ähnlichen Lagerbedingungen wie bei den Feldversuchen erhebliche Kornbindung bis hin zur Verfestigung festgestellt werden. Eine Rieselfähigkeit war hier nicht mehr gegeben. Die Proben hatten eher das Aussehen eines erhärteten Betons mit steifer Konsistenz und standen somit für weitere Untersuchungen nicht mehr zur Verfügung.

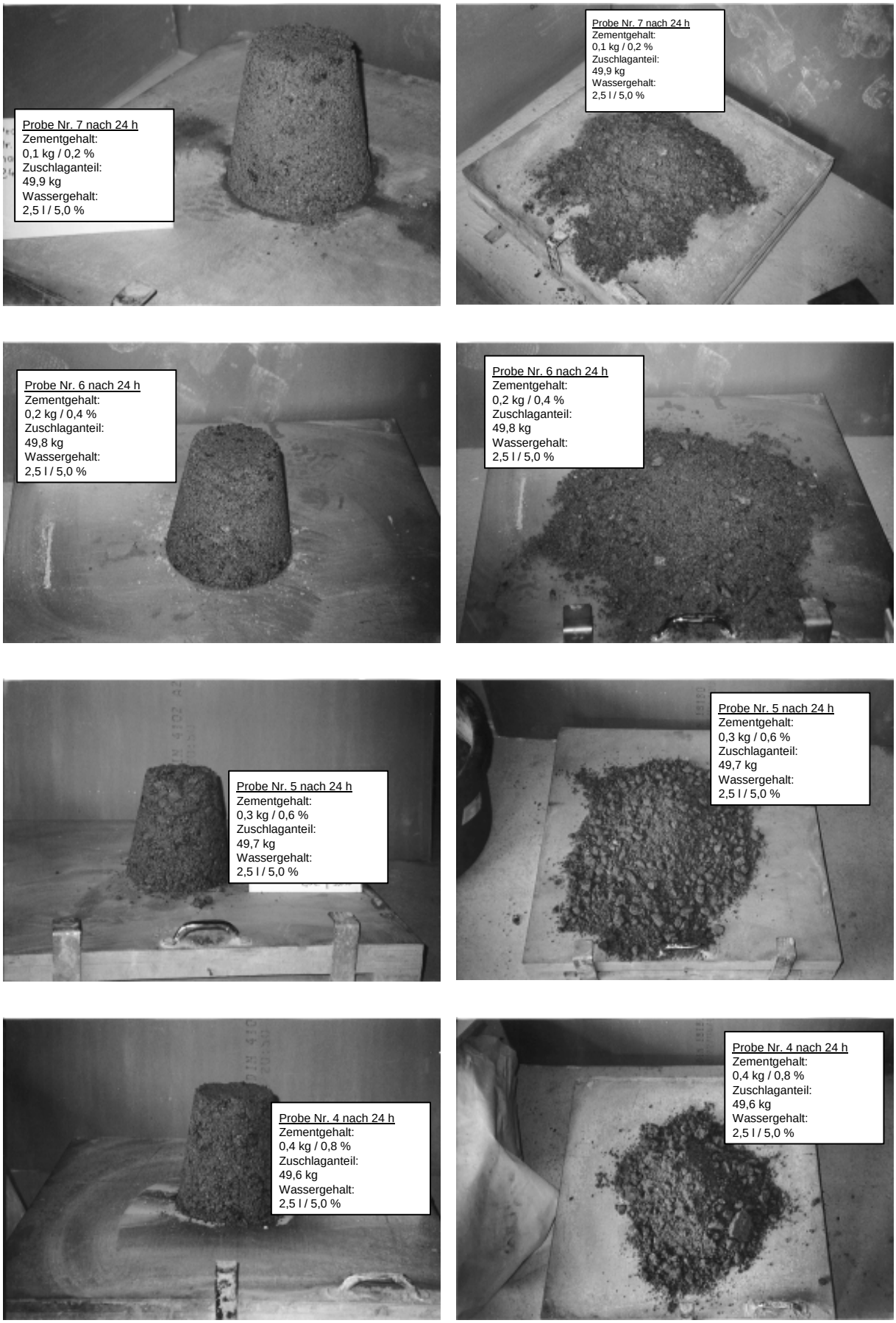


Bild 26: Restbetonzuschlagproben mit unterschiedlichem Fehlkorngehalt

Die Proben mit den Zementgehalten 0,2 %, 0,4 %, 0,6 % und 0,8 % wurden einer “Rieselfähigkeitsprüfung” unterzogen. Hierbei wurde der frisch hergestellte Restbetonzuschlag locker in eine auf einem Ausbreittisch befindliche kegelstumpfförmige Form gefüllt [92]. Nach zwölf Stunden wurde die Tischplatte 15 mal bis zum Anschlag angehoben und frei fallen gelassen. Das zerfallene Haufwerk konnte anschließend augenscheinlich beurteilt werden und ist in **Bild 26** dargestellt. In **Bild 26** sind bei den Zementgehalten 0,6 % und besonders bei 0,8 % deutliche Kornbindungserscheinungen zu beobachten. Bei einem Zementgehalt von 0,8 % wurden auch größere Körner miteinander verklebt. Diese Erscheinung konnte bei einem Zementgehalt von 0,6 % nicht beobachtet werden. Hier wurden nur kleinere Körner an die größeren gebunden. Erst ab einem Zementgehalt unterhalb 0,4 % konnten keinerlei Kornbindungserscheinungen mehr beobachtet werden. Um auf der sicheren Seite zu liegen, wurden die im Labor nachgestellten Restbetonzuschlagsproben nur mit Zement als Fehlkornanteil versehen. Die mit der Restbetonrecyclinganlage während der Versuchsreihe erzeugten Proben zeigten erst ab einem Fehlkorngehalt > 125 µm von ca. 2,5 % Kornbindungserscheinungen. Zudem hat sich das Aussehen des „natürlichen“ Restbetonzuschlags von dem „künstlichen“ Restbetonzuschlag deutlich unterschieden. Der „natürliche“ Restbetonzuschlag hatte das Aussehen eines haufwerksporigen Mischkieses, während der „künstliche“ Restbetonzuschlag oberhalb eines Fehlkorngehaltes eher das Aussehen eines Betons mit steifer Konsistenz besaß.

Die Unterschiede zwischen den Feinkorngehalten, bei denen Kornbindung auftritt, bei Restbetonzuschlag aus der Recyclinganlage oder aus dem Labormischer lassen den Schluss zu, dass es sich bei den Feinanteilen im Restbetonzuschlag keineswegs überwiegend um reaktive Zementpartikel, sondern um inerte Feinsandanteile handelt. Nur zu einem kleinen Anteil sind reaktive Zementpartikel vorhanden. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass die mechanischen Klassierer beim Restbetonrecycling nicht nur nach Aggregatzuständen und Korngröße, sondern im wesentlichen nach Dichtemerkmalen trennen.

Mit Hilfe der Korngrößenverteilungen allein können keine Aussagen über den noch für Reaktionen zur Verfügung stehenden Zementgehalt im Restbetonzuschlag gemacht werden:

- Die mittlere Trennkorngröße bei der Versuchsreihe beträgt ca. 170 µm.
- Die Partikeldurchmesser von unhydratisiertem Zement liegen bei handelsüblichen Zementen zu 100% unterhalb von 200µm und zu 90%-95% unterhalb von 90µm (Hydratationsdauer während der Versuche 10 min – 15 min).
- Aufgrund der sich einstellenden Feinstoffdichte im Restwasser von ≈ 2,1 t/m³ wird deutlich, dass sich die Zementpartikeldichten mit fortschreitender Hydratation deutlich verringern.

Da die Partikeldurchmesser der unbehindert im Restwasser hydratisierenden Zementpartikel nicht bekannt sind, kann auch keine Aussage darüber getroffen werden, wie hoch der Zementpartikelanteil im Restbetonzuschlag ist. Eine Aussage über die Reaktivität der Zementpartikel im Restbetonzuschlag und damit über das Kornbindungsverhalten kann nur mit Hilfe zusätzlicher nasschemischer Untersuchungsmethoden erfolgen.

5. Restwasserbehandlung

Das vom mechanischen Klassierer kommende Restwasser wird in die Suspendierbecken geleitet (MS_6, Kap. 3.3). Dort setzen sich die Feinstoffe des Restwassers ab und erhärten, wenn sie nicht mit Hilfe spezieller Suspendiereinrichtungen, i.d.R. Rührwerke, “in Schwebe” gehalten werden. Das Rühren von Suspensionen wird in der mechanischen Verfahrenstechnik häufig eingesetzt. Durch Durchsatzseintrag werden Strömungsvorgänge hervorgerufen, die den im Restwasser enthaltenen Feststoff mit sich führen und in der Flüssigkeit suspendieren.
Im folgenden werden die Grundlagen des beim Restbetonrecycling angewendeten Suspendierverfahrens (Rühren) erläutert. Des weiteren werden die verschiedenen Bauarten von Rührwerken sowie die maschinen- und bautechnischen Kenndaten erläutert.

5.1 Grundlagen der Suspendierung

Rührwerke gehören zu den Standardapparaten der mechanischen Verfahrenstechnik und sind in allen wichtigen Bauteilen genormt. Die beim Restbetonrecycling verwendeten Rührwerke gehören zur Klasse der Anbaurührwerke mit fluchtendem Getriebe (vgl. Kantorowitsch [38]). Ein Rührwerk besteht aus fünf Bauteilen, die auf dem Rührwerksrahmen, der parallel zur Restwasseroberfläche angeordnet ist, montiert sind. Die fünf Bauteile sind der Elektromotor, das Getriebe, die Kupplung, die Rührwerkswelle und der Rührwerksflügel. Getriebe, Kupplung und Welle dienen dazu, die mit dem Motor erzeugte Rotationsenergie über die Rührwerksflügel als Suspendierenergie in das Restwasser einzubringen.

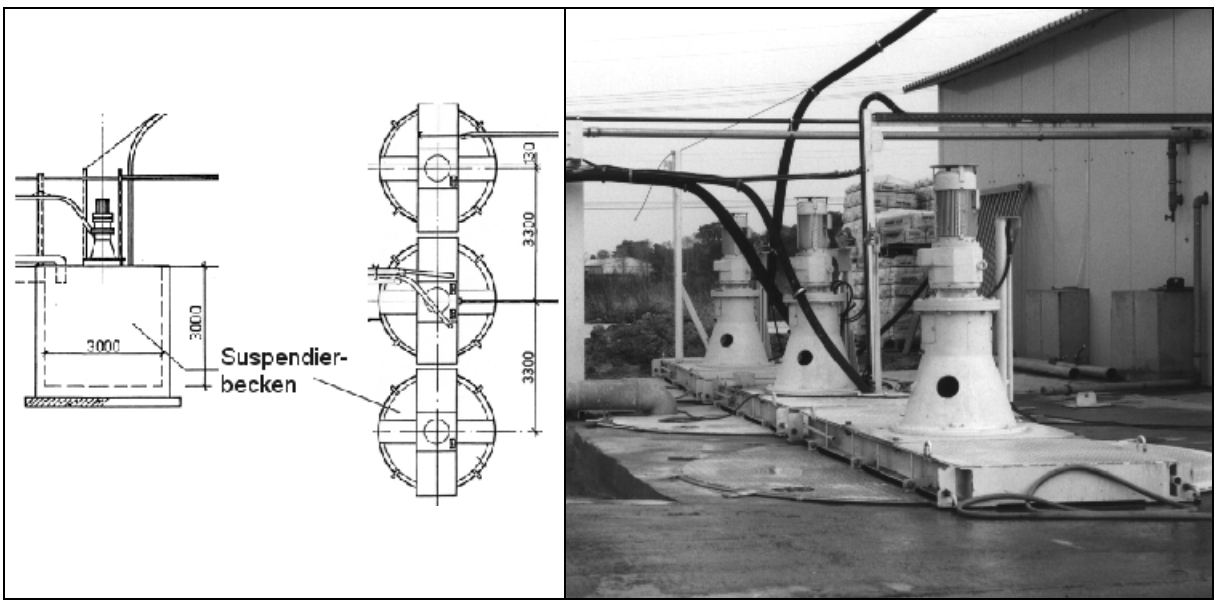


Bild 27: Suspendierbecken beim Restbetonrecycling

Dafür muss das Rührorgan eine abwärts gerichtete Axialströmung hervorrufen, die den Feststoff vom Boden aufwirbelt und durch die äußere Aufwärtsströmung im Behälter verteilt (**Bild 28**).

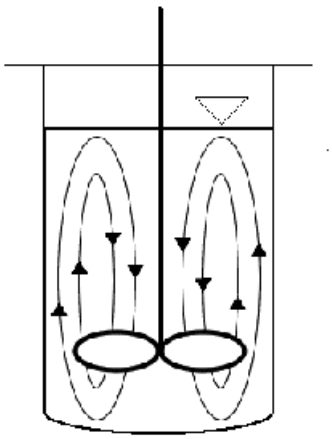
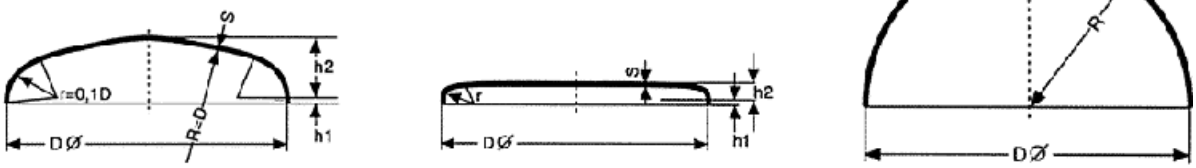


Bild 28: Strömungsbild im Suspendierbecken

Wird die Form der Behälterwand nicht dem Strömungsbild angepasst, kommt es zu Verwirbelungen und damit zu Ablagerungserscheinungen in den Totzonen. Zylindrische Behälter können anhand ihrer Bodenformen unterschieden werden. Es sind Klöpper-, Flach- und Kugelböden möglich (**Bild 29**). Dagegen wurden als Suspendierbecken benutzte ehemalige Absetzbecken immer mit Flachboden ausgeführt. Es lassen sich hinsichtlich der Ablagerungsneigung Entscheidungshilfen angeben (Projektziel 5).



Klöpperboden Flachboden Kugelboden

Bild 29: Bodenformen von Rührbehältern (nach Stieß [115] S. 201)

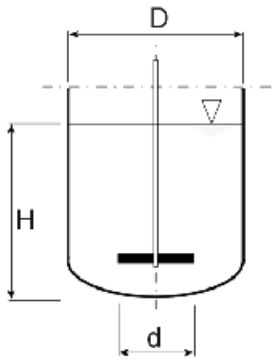
Zum Rühren stehen mehrere Rührertypen zur Verfügung, die sich für unterschiedliche Rühraufgaben (Dispergieren, Homogenisieren, Suspendieren, Emulgieren) mehr oder minder gut eignen. Für das Suspendieren kommen alle Rührertypen in Frage, die eine abwärts gerichtete Axialströmung erzeugen, z. B. Propellerrührer, Schrägblattrührer oder Kreuzbalkenrührer (**Bild 30**).

Eine Untersuchung der Wirksamkeit verschiedener Rührertypen für das Suspendieren hat Einenkel durchgeführt [21]. In die Untersuchung wurden der Propellerrührer, der Impellerrührer, der Schrägblattrührer und der Scheibenrührer einbezogen. Einenkel kommt zu dem Ergebnis, dass sich für das Suspendierbecken Propellerrührer und Impellerrührer am besten eignen [21]. Der Schrägblattrührer, der in der Regel beim Restbetonrecycling verwendet wird, lieferte das schlechteste Ergebnis. Im Unterschied dazu gibt Stieß die drei folgend dargestellten Rührertypen als suspendiertauglich an.

a) Schrägblattrührer

Vorzugsweise 6 rechteckige, mit konstantem Winkel angestellte Rührerblätter.

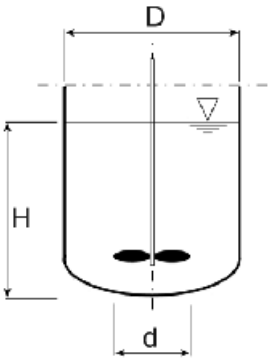
fördert primär:	axial
Umfangsgeschwindigkeit:	4 ... 10 m/s
Rühraufgaben:	Homogenisieren, Suspendieren, Wärmeaustausch



b) Propellerrührer

Meist dreiflügelig, mit konstantem oder nach außen flacher werdendem Anstellwinkel (vgl. Schiffsschraube).

fördert primär:	axial
Umfangsgeschwindigkeit:	2 ... 15 m/s
Rühraufgaben:	Homogenisieren, Suspendieren, Wärmeaustausch



c) Kreuzbalkenrührer

Mehrstufig über Kreuz angeordnete, oft unter 45° angestellte Rührarme.

fördert primär:	axial / tangential
Umfangsgeschwindigkeit:	2 ... 6 m/s
Rühraufgaben:	Homogenisieren, Suspendieren, Begasen, Wärmeaustausch

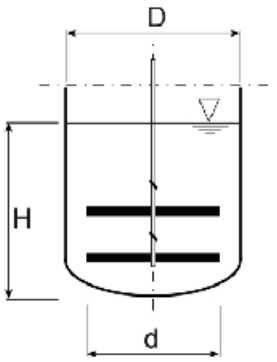


Bild 30: Rührerformen für das Suspendieren

Die strömungsmechanischen Vorgänge beim Suspendieren von Restwasser sind komplex. Einenkel hat die Vorgänge untersucht und die Einflussgrößen auf den sich einstellenden Suspendierzustand zusammengefasst [21]. Eine Gruppe von Einflussgrößen ergibt sich aus den Betriebsparametern (z. B. Rührdrehzahl). Eine weitere Gruppe wird durch die Eigenschaften der Suspension (Partikeldurchmesser, Feststoffanteil, Dichte der dispersen und der kontinuierlichen Phase, Viskosität der kontinuierlichen Phase) gebildet. Diese Stoffkennwerte werden zum Teil durch das Trennverhalten des mechanischen Klassierers (Kap. 4.3.2 f.) sowie durch die betontechnologischen Daten (Kap. 2.2 f.) bestimmt. Als letzte Gruppe werden von Einenkel apparative Einflussgrößen (Füllhöhe, Behälterdurchmesser, Rührerdurchmesser, Rührerbodenabstand, Rührertyp, Art und Anzahl von Stromstörern, Behälterart) genannt.

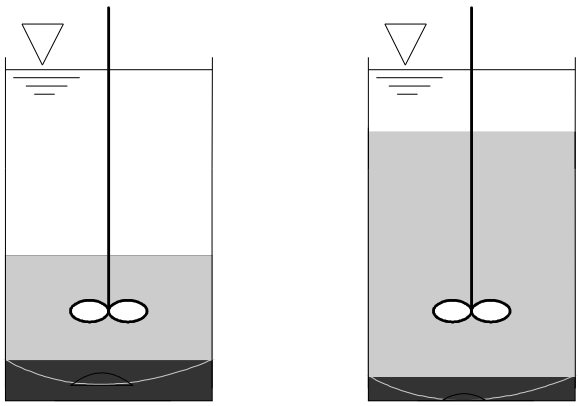
Im weiteren werden einige qualitative Aussagen über die Abläufe während des Suspendierens, insbesondere über die Vorgänge bei steigendem Energieeintrag in die Suspendierbecken gemacht. Hierbei ist eine Unterscheidung in teilweise und vollständige Suspension zu treffen (Schubert [109]). Die

Vorgänge, die man mit zunehmender Drehzahl beobachten kann, sind in den Abbildungen **Bild 31** und **Bild 32** dargestellt.

- **teilweise Suspension**

  Bei kleinen Drehzahlen liegen die Feinstoffe unbewegt am Boden des Suspendierbeckens. Wird die Drehzahl bis auf die Geschiebedrehzahl n_1 gesteigert, beginnt die Geschiebebewegung der Feinstoffe, verursacht durch die von der Strömung auf die Körner übertragenen Kräfte. Mit zunehmender Drehzahl wird die Feststoffschicht am Boden geringer bis hin zur Ausbildung eines feststofffreien ringförmigen Gebietes.

  Erreicht die Drehzahl den Wert n_2, so ist die Geschwindigkeit in Bodennähe so groß, dass einzelne Körner aufgewirbelt und von der Hauptströmung mitgenommen werden. Bei weiter steigender Drehzahl steigt die Schichthöhe der Suspension (**Bild 31**).



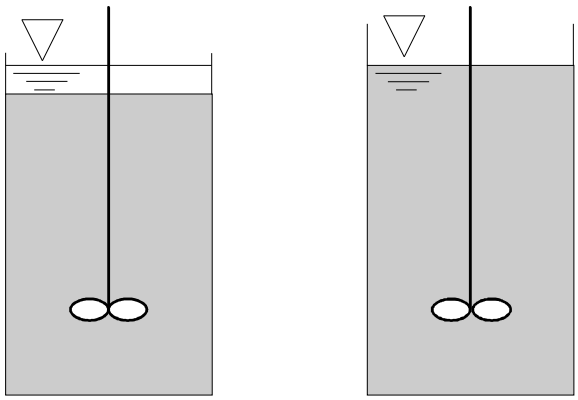
teilweise Suspension
Schichthöhe ca. 40 %

teilweise Suspension
Schichthöhe ca. 80 %

Bild 31: teilweise Suspension (nach Geisler [29] S. 10)

- **vollständige Suspension**

  Bei $n = n_3$ ist der Suspendierpunkt erreicht. Der Feststoff wird vollständig aufgewirbelt, einzelne Körner bleiben nicht länger als etwa eine Sekunde am Boden. Im oberen Teil des Rührbehälters kann sich eine feststofffreie Schicht ausbilden, da hier die nach oben gerichtete Komponente der Strömung kleiner als die Sinkgeschwindigkeit der Körner ist.



vollständige Suspension
Schichthöhe ca. 95 %

vollständige Suspension
Schichthöhe ca. 100 %
(homogene Suspension)

Bild 32: vollständige Suspension (nach Geisler [29] S. 10)

Bei Überschreiten einer weiteren kritischen Drehzahl $n \geq n_4$ sind die Zirkulation und Turbulenz im Rührbehälter so ausgeprägt, dass auch die feststofffreie Schicht in der Nähe der Flüssigkeitsoberfläche verschwunden ist. Dieser Zustand wird auch homogene Suspension genannt (**Bild 32**).

Für technische Anwendungen sind, aufbauend auf diesen Erkenntnissen, Suspendierkriterien entwickelt worden, die auf visuellen Messverfahren an Modellrührwerken basieren. Beim “1s-Kriterium” dürfen einzelne Feinstoffpartikel nicht länger als eine Sekunde am Behälterboden verweilen. Aus praktischen Überlegungen wird einsichtig, dass ein solches Beobachtungskriterium die menschliche Wahrnehmungsfähigkeit übersteigt und beim Restbetonrecycling nicht anwendbar ist. Das “Schichthöhenkriterium” gibt einen Bereich für die Suspendierintensität an, in dem die Feinstoffteilchen in der kontinuierlichen Phase aufgewirbelt werden. Da die Feinstoffe im Restwasser allerdings unterschiedliche Partikeldurchmesser haben, wird sich eine einheitliche Schichthöhe nur für die kleinsten Partikel angeben lassen. Darüber hinaus wird noch gezeigt, dass beim Restbetonrecycling die vollständige Suspension anzustreben ist. D. h., das Schichthöhenkriterium ist beim Restbetonrecycling ebenfalls nicht anwendbar. Da beim Restbetonrecycling in den Modellrührwerken die erforderlichen Parameter nicht beobachtet werden können, ist eine Hochrechnung gemäß der Ähnlichkeitstheorie auf die späteren großtechnisch durchzuführenden Suspendieraufgaben nicht möglich [21]. Dies macht, wie später gezeigt wird, andere Bemessungsverfahren erforderlich.

5.2 Bautechnische Kenndaten

5.2.1 Anordnung im Grundriss und in der Ansicht

Es lassen sich, wie beim mechanischen Klassierer, drei Möglichkeiten zur Anordnung in der Ansicht beschreiben: Überflur, Unterflur oder Teilversenkt.
Die für die Beantwortung der Frage nach der Anordnung in der Ansicht zu behandelnden Kriterien - hier Teilkriterien der Materialströme MS_4 (Kap. 3) und MS_{10} (Kap. 3) - beziehen sich zum Teil auf die Höhendifferenzen zu den vor- und nachgeschalteten Komponenten. Auch hierbei gilt, dass die infragekommenden Kriterien bereits als Teilkriterien der Führung der Materialströme beschrieben wurden.
Ein weiteres Kriterium, das sich aus der Anordnung in der Ansicht des Betonwerkes ergibt, ist die Funktionstüchtigkeit der Recyclinganlage im Winterbetrieb. Bei allen nassmechanischen Aufbereitungsmaschinen ist die Gefahr des Einfrierens gegeben. Kann ein eingefrorener mechanischer Klassierer trotz Isolierung noch mit relativ geringem Aufwand (z. B. Bedampfen) aufgetaut werden, wird ein zugefrorenes Suspendierbecken nicht mehr ohne weiteres vom Eis befreit werden können. Die frostsichere Auslegung der Suspendierbecken wird anhand der örtlichen Klimaverhältnisse vorgenommen. Neben Isolierung der Außenwand, Aufheizen des Restwassers oder Erhöhung der Suspendierenergie gibt es die Möglichkeit, die Erdwärme zu nutzen, um ein Einfrieren des Restwassers zu verhindern. Selbst bei längerem Dauerfrost gefriert in Mitteleuropa der Boden nur bis in einige Dezimeter Tiefe. Je tiefer also der Beckenboden unterhalb der Geländeoberkante angeordnet wird, umso stetiger ist der Verlauf der Restwassertemperatur. Auch ist die Außenfläche der Suspendier-

becken, an der auch bei längerem Dauerfrost noch Temperaturen über dem Gefrierpunkt herrschen, größer und die Gefahr eines Einfrierens sinkt. Aufbauend hierauf können konkrete Entscheidungshilfen angegeben werden (Projektziel 11).

Zur Ausführung im Grundriss werden Suspendierbecken mit runden und rechteckigem Querschnitt unterschieden. In zylindrischen Behältern zentrisch angeordnete Rührer rufen - außer bei laminarer Strömung - ein meist unerwünschtes Mitrotieren der Rührguts hervor. Die Bewegung ähnelt dem Starrkörperwirbel, der Mischeffekt geht zurück und es bildet sich eine *Trombe* aus, ein zentrisches Absenken der Oberfläche wie beim Badewannenwirbel (Kantorowitsch [38]). Das kann bis zum Ansaugen und Eintragen von Luft gehen. Um dem entgegenzuwirken, können Stromstörer eingebaut werden. Dies sind senkrechte, meist in geringem Abstand von der Wand angebrachte Leisten. Sie verhindern die Rotation des Behälterinhaltes als Ganzes, sorgen für zusätzliche Turbulenz und verbessern dadurch das Mischen. Allerdings erfordert das Rühren dann auch einen erhöhten Leistungsseintrag. Wegen der hinter den Stromstörern verlangsamten Strömung (Totzonen) verlängert sich darüber hinaus die Verweilzeit des Rührguts im Vergleich zu kontinuierlich durchströmten Rührbehälter.

Häufig werden in Betonwerken die ehemaligen Absetzbecken als Suspendierbecken weitergenutzt. Diese Becken weisen in der Regel einen rechteckigen Grundriss auf. Hier wirken die Ecken ähnlich wie Stromstörer. Die Strömungsvorgänge in rechteckigen Suspendierbecken sind mathematisch nicht beschreibbar. Beide Möglichkeiten (zentrisch mit Stromstörer oder eckig) haben den unerwünschten Nebeneffekt der Totzonen, also der Bereiche geringer Strömungsgeschwindigkeit, in denen die Gefahr von Ablagerungen an den Innenwänden der Suspendierbecken steigt. Aufbauend hierauf können Entscheidungshilfen angegeben werden (Projektziel 4).

5.2.2 Größe des Suspendierraumes

Die erforderliche Größe des Suspendierraumes wird durch eine wasserwirtschaftliche Berechnung unter Berücksichtigung der Zu- und Abflüsse ermittelt.

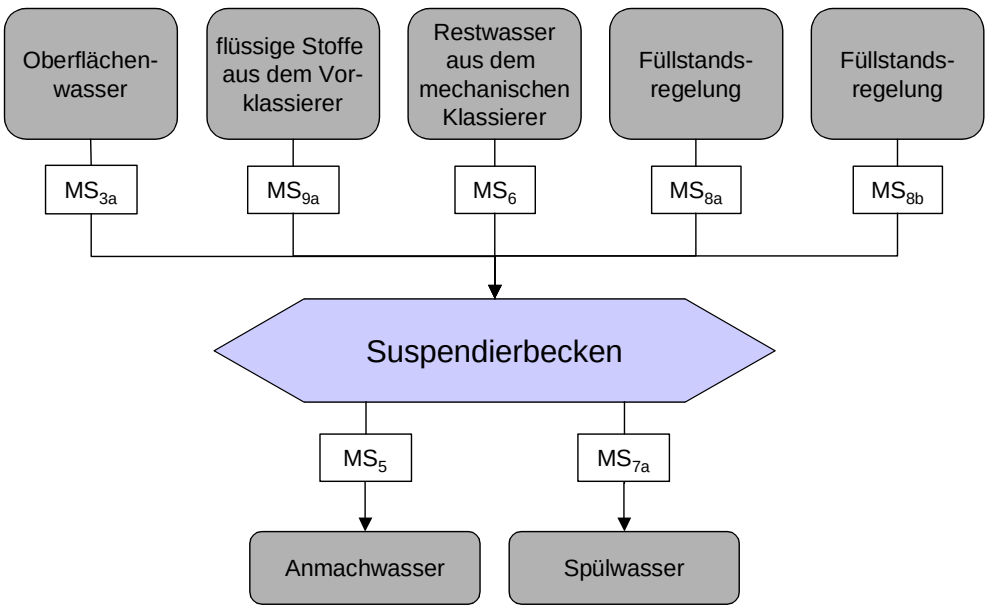


Bild 33: Zu- und Abflüsse des Suspendierbeckens nach Bild 7

Die in **Bild 33** dargestellten Zu- und Abflüsse unterliegen großen Schwankungen. Aus diesem Grund muß die Dimensionierung der Suspendierbeckengröße sehr sorgfältig durchgeführt werden. Qualitativ können die Materialströme wie folgt beschrieben werden:

- Oberflächenwasser (MS_{3b}): über den Abscheider kann das Oberflächenwasser in das Suspendierbecken geleitet werden. Die Menge des Zuflusses wird aus den Geländeverhältnissen sowie der ortsüblichen Regenspende ermittelt. Der Zufluss kann sich zwischen Null $^{l}/_{h}$ und einigen hundert $^{l}/_{h}$ bewegen.
- Flüssige Stoffe aus dem Vorklassierer (MS_{9a}): Das Oberflächenwasser sowie der Restbeton aus der Mischanlage und das damit verbundene Spülwasser können in das Suspendierbecken geleitet werden. Die Dimensionierung dieses Materialstromes ist mit dem Materialstrom MS_{3b} (Oberflächenwasser) vergleichbar.
- Restwasser aus dem mechanischen Klassierer (MS_6): Das vom mechanischen Klassierer kommende Restwasser wird dem Suspendierbecken zugeführt. Die Größe des Zuflusses hängt ab von der verwendeten Spülwassermenge sowie von apparativen Einflüssen und der Anzahl der Fahrmischer. Der Zufluss kann Null $^{l}/_{h}$ bis einige tausend $^{l}/_{h}$ betragen.
- Füllstandsregelung (MS_{8a}/MS_{8b}): Der Füllstand im Suspendierbecken kann durch einen Zufluß aus dem öffentlichen Leitungsnetz (MS_{8b}) sowie einem Zufluß aus dem Reservebecken (MS_{8a}) erhöht werden. Die Größe des Materialstromes ist abhängig von den verwendeten Pumpen.
- Spülwasser (MS_{7a}): In der Regel wird das Spülwasser dem Suspendierbecken entnommen. Die Größe des Materialstromes ist ungefähr vergleichbar mit der Größe von Materialstrom MS_6.
- Anmachwasser (MS_5): Ein Abfluss besteht in dem als Anmachwasser verwendeten Restwasser. Die Größe des Materialstromes hängt ab von der Produktionsdurchsatz des Betonwerkes und kann von Null auf 15,0 $^{m^3}/_{h}$ bis 20,0 $^{m^3}/_{h}$ anwachsen.

Es wird deutlich, daß das Suspendierbecken als Puffer Schwankungen ausgleichen muß. Erfahrungsgemäß bestehen an die Größe des Suspendierraumes vier Anforderungen:

- Für den Fall, dass eine überdurchschnittlich große Menge an Oberflächenwasser anfällt und keine Möglichkeit besteht, dieses Oberflächenwasser durch andere Maßnahmen (Kanalisation, Reservebecken) weiterzuleiten, muss das Suspendierbecken über eine Reservekapazität verfügen, um dieses Oberflächenwasser aufzunehmen.
- Um die Versorgung des Mischturmes mit Anmachwasser und des Wassergalgens mit Spülwasser sicherzustellen, muss im Suspendierbecken eine ausreichende Menge an Restwasser zur Verfügung stehen, um nicht auf externes Wasser zurückgreifen zu müssen.
- Im technischen Regelwerk wird die maximale Restwasserdichte auf 1,07 kg/dm³ begrenzt. Wenn dieser Maximalwert nicht über eine Verschneidung von Restwasser mit externem Wasser gesteuert werden soll, muss der Maximalwert über die Größe des Suspendierraumes realisiert werden. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Restwasserdichte bei zunehmender Größe des Suspendierraums sinkt, weil sich die Feststoffmenge in einer größeren Wassermenge verteilen kann. Es lassen sich jedoch für jede realistische Suspendierbeckengröße Fälle konstruieren, für die die maximale Restwasserdichte überschritten wird. Fortgesetztes Recycling (Zuführen von

Restwasser hoher Dichte) ohne Betonproduktion (Abführen von Restwasser) ist ein derartiges Beispiel. Dieses Risiko kann verringert werden, indem Suspendierbecken eingesetzt werden, deren Größe es ermöglicht, die Restwasserdichte zu verringern.

- Der Suspendierraum ist so zu bemessen, dass trotz der arbeitstäglichen Schwankungen des Pegelstandes ein konstanter Suspendiereffekt erreicht wird. Die Schwankungsbreite des Pegelstandes kann sich aus der Berechnung der maschinentechnischen Kenndaten ergeben.

Um den vorgenannten Anforderungen gerecht zu werden, wird das Suspendierbecken in drei Zonen aufgeteilt (**Bild 34**):

- Die Zone 1 erstreckt sich vom Beckengrund bis zum Pegeltiefststand oberhalb des Rührorgans. Dies ist der Raum, der mindestens zur Verfügung stehen muss, um ein Suspendieren zu ermöglichen. Die Größe der Zone 1 wird durch die rührmaschinentechnischen Erfordernisse bestimmt, da das Rührorgan ständig von Restwasser umgeben sein muss.
- Die Zone 2 erstreckt sich vom Pegeltiefststand bis zum Pegelhöchststand. Innerhalb dieser Zone bewegen sich die normalen Schwankungen des Pegelstandes. Gleichzeitig wird hiermit der Raum markiert, der für Anmachwasser zur Verfügung steht.
- Die Zone 3 erstreckt sich vom Pegelhöchststand bis zum obersten Punkt des Suspendierbeckens. Dies ist der Raum, der erforderlichenfalls eine überdurchschnittlich große Menge an Oberflächenwasser aufnehmen muss. Dieser Raum kann auch vom Suspendierbecken getrennt werden und als selbständiges Becken (Reservebecken) ausgelegt werden.

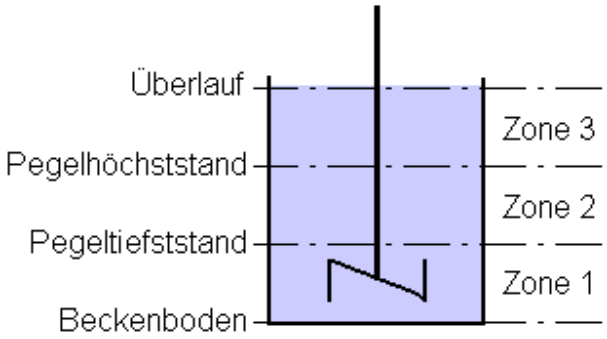


Bild 34: Aufteilung des Suspendierraumes

In der Praxis ist es derzeit üblich, die Größe des Suspendierraumes zu schätzen. Allenfalls die Anzahl der Fahrmischer wird als Bezugsgröße herangezogen. Als Suspendierbecken genutzte, frühere Absetzbecken haben ein Fassungsvermögen von ca. 60 m³ bis 150 m³. Heute werden in der Regel zylindrische Becken eingesetzt mit einem Fassungsvermögen von ca. 20 m³ bis 30 m³. Je nach Erfordernis werden mehrere solcher Becken verwendet. Die Ausführungen in diesem Kapitel haben verdeutlicht, daß es durchaus möglich ist, den erforderlichen Suspendierraum zu berechnen. Aufbauend hierauf lassen sich Entscheidungshilfen angeben (Projektziel 2).

5.3 Maschinentechnische Kenndaten

Aus mehreren Gründen ist es von Vorteil, wenn die Feinstoffe im Restwasser möglichst gut verteilt vorliegen (homogene Suspension).

- Bei aufeinanderfolgenden Verwiegevorgängen verändert sich der Feinstoffgehalt im Anmachwasser nur unwesentlich. Dies ermöglicht eine Betonproduktion mit kontinuierlichem Feinstoffgehalt.
- Durch die vollständige und gleichmäßige Verteilung der Feinstoffe im Restwasser wird sichergestellt, daß stets die durchschnittlich niedrigste Dichte erreicht wird.
- Es wird erreicht, daß die Ablagerungen minimiert werden.

Die genannten Gründe legen es nahe, als Suspendierkriterium für das Restbetonrecycling die homogene Suspension zu wählen. Die dafür erforderliche Drehzahl hängt von der Behältergeometrie, der Art und den Abmessungen des Rührorgans sowie den Stoffkennwerten der Suspension und der Partikel in der Suspension ab. Im Folgenden soll für die Restbetonrecyclinganlage in Ludwigsfelde exemplarisch die Rührdrehzahl n auf der Grundlage eines von Voit/Mersmann hergeleiteten Strömungsmodells berechnet werden [122]. Dabei wird von folgenden Daten ausgegangen:

- Behältergröße und -form sowie Behälterart
  - Behälterart: zylindrisch mit Flachboden
  - Behälterhöhe: H = 3 m (auch Füllhöhe)
  - Behälterdurchmesser: D = 3 m
- Rührorgan
  - Rührerart: Propellerrührer (abweichend von der Recyclinganlage in Ludwigsfelde, um Einsparungspotentiale aufzuzeigen)
  - Rührerdurchmesser: d = 1 m
  - Volumenstromzahl: N_V = 0,8 (Förderkennwert)
  - Konstante: K = 25
- Stoffkennwerte
  - Feststoffvolumenanteil der Suspension φ_v

    Dichte des Restwassers: $?_{RW}$ = 1,07 [kg/dm³]

    Dichte des Feststoffes: $?_{FS}$ = 2,1 [kg/dm³]

    $$\varphi_v = \frac{?_{RW} - 1}{?_{FS} - 1} = 0{,}064[-] \qquad \textbf{(Gl. 13)}$$

  - Lückenvolumenanteil der Feststoffschüttung e

    Da unterschiedliche Kornverteilungen vorliegen können, wird ein Bereich für e angegeben:

    0,25 = e = 0,75
- Sinkgeschwindigkeiten

  w_s: Einzelkornsinkgeschwindigkeit [m/s]

  w_{ss}: Sinkgeschwindigkeit im Schwarm [m/s]

  Da unterschiedliche Korngrößen vorliegen, wird vereinfachend die Annahme $(w_s/w_{ss})^2 = 1$ getroffen.

- Partikeldurchmesser 1 µm = d_p = 200 µm (Hiermit wird der gesamte Kornverteilungsbereich abgedeckt)
- Modifizierte Froude-Zahl

  Hierbei wird davon ausgegangen, dass kleine Partikel (µm-Bereich) in großen Rührbehältern (m-Bereich), im Gegensatz zu großen Partikeln (mm-Bereich) in kleinen Rührbehältern (dm-Bereich), mit einer Wahrscheinlichkeit von nahezu Null am Behälterboden auftreffen:

$$Fr^* = \frac{n^2 \cdot d^2 ? }{d_p \cdot \Delta ? \cdot ?} = 2\left(\frac{D}{d}\right)^4 \frac{1}{N_v{}^2}\left(\frac{N_v}{N_{vs}}\right)^2\left(\frac{w_{ss}}{w_s}\right)^2 \qquad \textbf{(Gl. 14)}$$

wobei ? [kg/m³]: Flüssigkeitsdichte

?? [kg/m³]: Dichtedifferenz zwischen Feststoff und Flüssigkeit

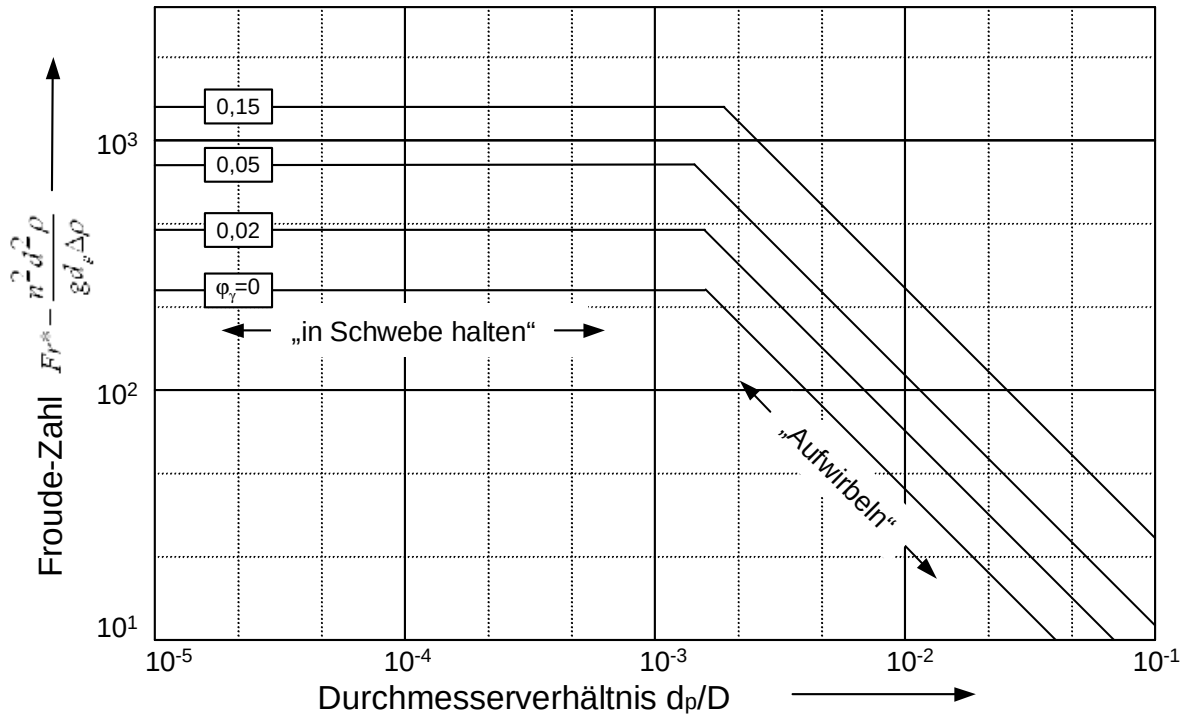


Bild 35: Modifizierte Froude-Zahl als Funktion des Durchmesser-Verhältnisses, berechnet für einen Propellerrührer D/d=3, H/D=1 [122]

- Volumenstromdrehzahl der Suspension: $N_{vs} = \frac{N_v}{1 + k \cdot \varphi_v}$ **(Gl. 15)**
- $N_{vs} \frac{0{,}8}{1 + 25 \cdot 0{,}064} = 0{,}3077$
- $Fr^* = 2\left(\frac{3}{1}\right)^4 \cdot \frac{1}{0{,}8^2}\left(\frac{0{,}8}{0{,}3077}\right)^2 \cdot 1^2 = 1711$

- Umdrehungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Feinstoffdurchmesser
  (exemplarisch für den Durchmesser d=125µm)

$$n_{125\mu m} = \sqrt{\frac{Fr^* \cdot d_p \cdot \Delta\rho \cdot g}{d^2 \cdot ?}} = \sqrt{\frac{1711{,}04 \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 9{,}81}{1{,}1}}$$
$$= 1{,}381\ s^{-1} = 83\ min^{-1}$$

  für den hier berechneten Rührertyp.

In der Praxis werden derzeit grundsätzlich Schrägblattrührer mit 60 Umdrehungen/Minute eingesetzt. Die Ausführungen machen deutlich, dass eine Bemessung der Rührorgane sehr sinnvoll sein kann (z. B. Energiebedarfsoptimierung). Darüber hinaus wird deutlich, dass sich die erforderliche Rührerdrehzahl mit steigenden Feststoffpartikeldurchmessern vergrößert. Eine Variierung der Rührerdrehzahlen ist an bisherigen Recyclinganlagen nicht vorgesehen.
Aufbauend hierauf lassen sich konkrete Entscheidungshilfen angeben (Projektziel 3).

6. Weitere Komponenten der Recyclinganlage

Die nassmechanische Aufbereitung von Restbeton erfordert neben den beiden Hauptkomponenten Klassierer und Suspendierbecken weiterhin den Wassergalgen, der zur Befüllung der Fahrmischer mit Spülwasser dient, und Kläreinrichtungen zur Klärung des Oberflächenwassers. Darüber hinaus kann optional ein Reservebecken verwendet werden. Auf eine Beschreibung der benötigten Pumpen hinsichtlich der Wahl des Pumpentypes sowie die Auslegung der maschinentechnischen Kenndaten wird an dieser Stelle verzichtet, da diese in der Literatur eingehend beschrieben wurden (Martz [54]).

6.1 Wassergalgen

Der Wassergalgen dient zum Befüllen der Fahrmischertrommeln mit Wasser (**Bild 36**). Dieses Wasser wird zum Säubern der Trommelinnenflächen verwendet. Die entstehende Restbetontrübe wird anschließend in den mechanischen Klassierer aufgegeben. Die Konstruktion des Wassergalgens richtet sich nach der Befüllhöhe der Fahrmischer.

Zwei entscheidungsmaßgebende Kriterien können angeführt werden. Zum einen richtet sich die aufzunehmende Menge an Spülwasser nach der Größe der Mischfahrzeuge, nach den betontechnologischen Parametern des Restbetons und nach der Restbetonmenge. Für häufig wiederkehrende Spülsituationen sind fest eingestellte Vorgaben hinsichtlich der Spülwassermenge sinnvoll, um Fehler bei der Spülwassermenge zu vermeiden. Dieser Aspekt wurde bereits im Kap. 3 behandelt.

Zum anderen wird durch die Anordnung mehrerer Wassergalgen die zuvor erwähnte Dauer (Kap. 4.3.1) der dem Auswaschprozess vor- und nachgeschalteten Maßnahmen reduziert. Als Beispiel kann das gleichzeitige Spülen mehrerer Fahrmischer dienen, die anschließend nacheinander die Restbetontrübe entleeren.

Da die beiden Kriterien, die sich am Wassergalgen stellen, bereits an anderer Stelle berücksichtigt wurden, liefert die Betrachtung des Wassergalgens keine selbständigen Kriterien zur Beurteilung der vorliegenden Entscheidungssituation.

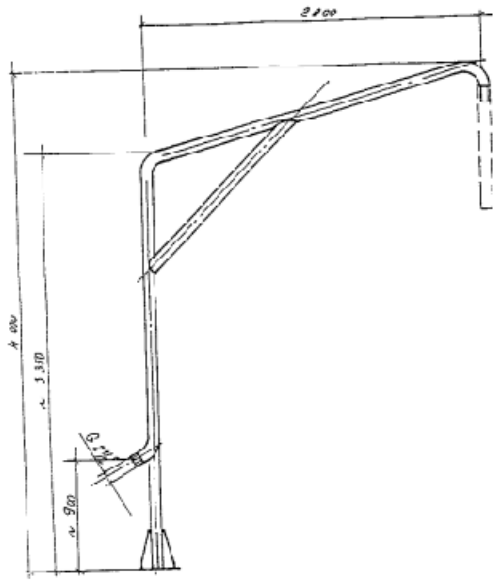


Bild 36: Wassergalgen

6.2 Abscheider

Bei dem in den Recyclingprozess einbezogenen Oberflächenwasser kann eine Reinigung erforderlich werden. Sie kann ein- oder zweistufig erfolgen. Für eine einstufige Reinigung eignet sich die in **Bild 37** dargestellte Anlage.
Das Oberflächenwasser kann auch einem Vorklassierer zugeführt werden. Ein Vorklassierer ist geeignet, Schwimm- und Sinkstoffe abzuscheiden. Parker [78] erläutert die konstruktive Gestaltung des bei ihm “sloped slap system” genannten Vorklassierers im wesentlichen als ein angeramptes Becken (**Bild 37**).

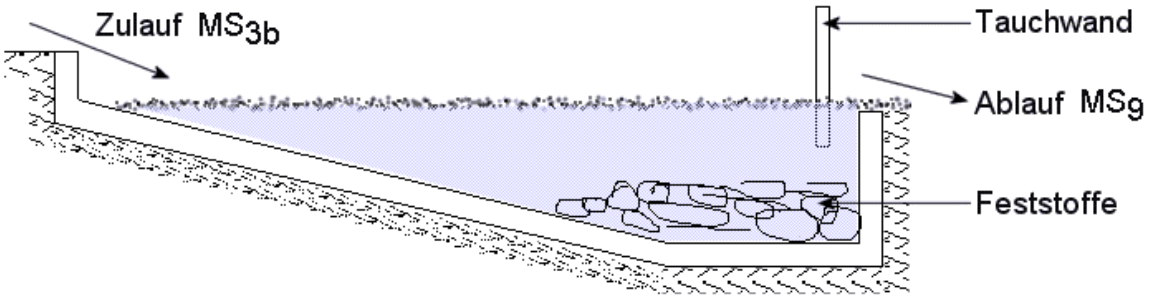


Bild 37: Vorklassierer

Die Sinkstoffe des in das Becken einlaufenden Wassers setzen sich am tiefsten Punkt ab. Diese Feststoffe werden nach dem Absetzen mit einem geeigneten Gerät (z. B. Radlader) beräumt. Die flüssigen Inhaltsstoffe werden über ein Überlaufwehr geleitet. Zum Abscheiden von Schwimmstoffen kann auch eine Tauchwand angeordnet werden. Ein Vorklassierer ist für den Betrieb einer Recyclinganlage nicht erforderlich und stellt eine Option dar. Die konstruktiven Merkmale eines Vorklassierers können aber derart genutzt werden, dass weitere Abscheider um die Komponenten zum Trennen von sink- und schwimmfähigen Stoffen vermindert werden können.
Für eine zweistufige Reinigung eignet sich zusätzlich die in **Bild 38** dargestellte Anlage. Die Abscheideanlage besteht aus einem Schlammabscheider, einem Ölabscheider sowie einem Koaleszensabscheider und ist geeignet, das Oberflächenwasser bzgl. Ölen und Fetten sowie absetzbaren Stoffen entsprechend den Grenzwerten zu reinigen [91]. Dies kann insbesondere bei der Fahrzeugaußenreinigung erforderlich werden, weil hierbei mit Ölen und Fetten befrachtetes Waschwasser entsteht. Die Behälter der Anlage bestehen aus monolithischem Stahlbeton und sind mit einer Epoxydharz-Innenbeschichtung versehen. Einbauteile bestehen aus Edelstahl.

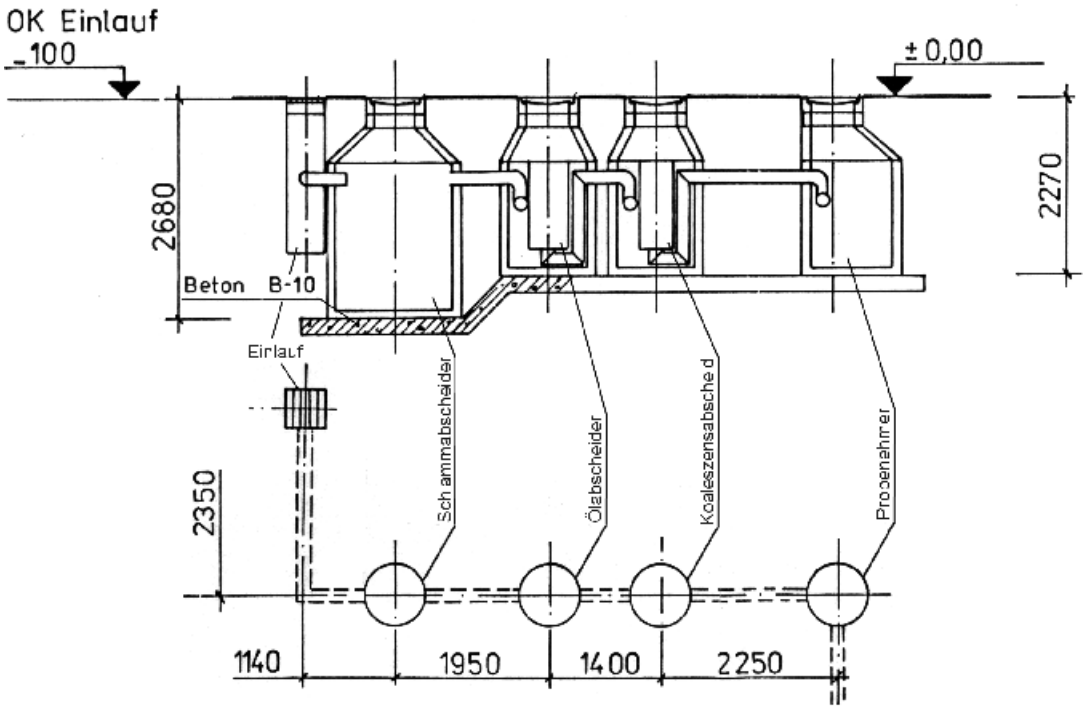


Bild 38: Abscheider

Es muss berücksichtigt werden, dass die in der Kläreinrichtung abgeschiedenen Stoffe regelmäßig entsorgt werden müssen. Dies geschieht i.d.R. durch Abpumpen mit Hilfe von Spezialfahrzeugen. Diese Spezialfahrzeuge halten sich während des Abpumpvorganges im Arbeitsbereich der Fahrzeuge auf, die ihre Innenflächen säubern müssen, so dass es zu Konfliktzeiten kommen kann.
Gemeinsam mit den Kriterien, die sich aus der Führung des Oberflächenwassers ergeben, lassen sich Entscheidungshilfen (Projektziel 12, S. 86) angeben.

7. Systemtechnik

7.1 Einführung

Aus den Grundlagen der Recyclingtechnik wird ersichtlich, dass die konkrete Entscheidungsfindung bei der Planung von Anlagen zum nassmechanischen Recycling von Betonrestmassen von unterschiedlichen Kriterien beeinflusst wird. Neben quantifizierbaren fließen auch nicht quantifizierbare Kriterien, insbesondere subjektive, in die Entscheidung ein. Die daraus resultierende komplexe Entscheidungssituation macht es erforderlich, ein operationales Ablaufschema heranzuziehen, mit dessen Hilfe die notwendigen Daten gesammelt und bewertet werden können. Diese fließen als Entscheidungsvorbereitung in die Entscheidungsfindung ein. Hierbei gilt im Zuge dieser Untersuchungen die Arbeit von Zangemeister [134] als Standardwerk hinsichtlich der Beschreibung der Grundlagen der Systemtechnik.
Ein solches Ablaufschema kann aus der Systemwissenschaft gewonnen werden, die sich als “interdisziplinäre Wissenschaft vom zweckorientierten Handeln” herausgebildet hat. Nach Zangemeister ist es “Ziel und Aufgabe der Systemwissenschaft ..., Erkenntnisse zu gewinnen und Methoden zu entwickeln, mit deren Hilfe Handlungsempfehlungen in Hinblick auf konkrete Aktionsaufgaben gegeben werden können.” Eine Teildisziplin der Systemwissenschaft ist die Systemtechnik, mit der die praktische Anwendbarkeit systemwissenschaftlicher Erkenntnisse erreicht werden soll. Sie umfasst Methoden und Verfahren, die zur Konzipierung, Analyse, Auswahl und Realisierung von komplexen Systemen notwendig sind. Die für diese Arbeit herangezogene Nutzwertanalyse ist eines der Verfahren der Systemtechnik und soll hier auf das Restbetonrecycling angewendet werden. Der Vorteil der Nutzwertanalyse besteht darin, dass ein komplexer Sachverhalt so aufgeschlüsselt wird, dass die Entscheidungsfindung systematisiert und damit transparent gemacht werden kann. Für den Entscheidungsträger, in kleinen und mittelständischen Unternehmen zumeist nur eine Person, wird damit, ausgehend von seinen individuellen Wertvorstellungen, die Entscheidungsfindung erleichtert und im Ergebnis technologisch rationeller.

7.2 Zielsystem

Ausgehend von einem zunächst ungeordnetem Zielkatalog wird durch die Gliederung und Ordnung der Ziele ein Zielsystem entwickelt. “Das Zielsystem einer Organisation besteht aus der geordneten Menge aller handlungsbestimmenden Ziele, die bei der Ableitung einer rationalen Entscheidungsempfehlung zu berücksichtigen sind.”
Die Formulierung der einzelnen Ziele und ihre widerspruchsfreie Strukturierung zu einem Zielsystem ist die zentrale Voraussetzung für eine rationale Entscheidung bei Problemen mit mehrfachen Zielsetzungen. Die Erstellung eines Zielsystems ist somit die Ausgangsbasis für die weiteren informationsgewinnenden und -verarbeitenden Prozesse im Rahmen der Nutzwertanalyse. Eine Gliederung ergibt sich aus der systematischen Suche, Auswahl und Ordnung der maßgeblichen Ziele aufgrund der momentanen individuellen Wertvorstellungen der gegebenenfalls an der Problemlösung beteiligten Personen.
Für die Aufstellung des für den Entscheidungsgegenstand relevanten Zielsystems - des eigentlich kreativen Prozesses bei der Durchführung der Nutzwertanalyse - sind noch einige Erläuterungen

hinzuzufügen. Diese beziehen sich im wesentlichen auf die Grundlagen zur Erstellung eines Zielsystems und die möglichen Beziehungen zwischen den Zielen. Die praktische Anwendung auf das Problem der Recyclingtechnik erfolgt in Kap. 8.

7.2.1 Aufstellung des Zielsystems

Die Aufstellung des Zielsystems beginnt mit der Formulierung des allgemeinen Programmzieles. Auf der Basis einer Bedarfsanalyse (z. B. technisches Regelwerk) und der gewünschten Tätigkeitsentfaltung (z. B. Ressourcenschonung) wird für die Zwecke dieser Arbeit das allgemeine Programmziel “optimales Restbetonrecycling” angelegt. Dieses allgemeine Programmziel wird sodann in spezielle Programmziele und schließlich in Projektziele untergliedert. Mit größer werdender Genauigkeit, die durch eine Untergliederung der Ziele in mehrere Untergliederungsstufen erreicht werden kann, steigt der Quantifizierungsgrad, so dass die Ziele am Ende der Untergliederung leicht zu überprüfende Leitindizes (messbare Entscheidungskriterien) darstellen.
Die Formulierung der maßgebenden Ziele ist für die weitere Nutzwertanalyse maßgeblich: “Wichtiger als die Auswahl des richtigen Systems (Projektes) ist es, zunächst die richtigen Ziele zu bestimmen. Denn wählt man die falschen Ziele, dann löst man eine irrelevante Problemstellung; wählt man dagegen ein falsches System (auf der Basis der richtigen Ziele), so wählt man letztlich nur ein nicht optimales System.”
Das Zielsystem muss eine endliche Menge von Einzelzielen mit - je nach Problemstellung und Entscheidungssituation - unterschiedlichem Inhalt enthalten. Für das vorliegende Problem sind diese u.a. verfahrenstechnischer oder betontechnologischer Natur. Das Zielsystem selbst liefert Entscheidungskriterien, die aus den einzelnen Zielen widerspruchsfrei abgeleitet wurden, und nach denen die möglichen Alternativen letztendlich gemessen und bewertet werden. Es ist somit darauf zu achten, zunächst ein möglichst vollständiges Zielsystem zu beschreiben. Nur wenn alle projektrelevanten Ziele und Zielkomponenten berücksichtigt werden, ist es möglich, der komplexen Wirklichkeit und den Wertvorstellungen der Entscheidungsperson umfassend Rechnung zu tragen.

7.2.2 Struktur des Zielsystems

Das Zielsystem kann sowohl in eine vertikale als auch in eine horizontale Zielordnung unterteilt werden. Die vertikale Zielordnung wird aufgrund von Zweck-Mittel-Beziehungen vorgenommen. Die Beziehungen werden durch die Komplementarität zwischen den Zielen gebildet, d. h. mit zunehmendem Zielerfüllungsgrad des untergeordneten Zieles muss ein zunehmender Zielerfüllungsgrad des übergeordneten Zieles verbunden sein und umgekehrt. Die horizontale Zielordnung kann einerseits nach funktionalen Zielinhalten wie z. B. sozial relevanten Zielen, wie Beschäftigungsziele, Versorgungsziele, technisch relevanten Zielen, wie Qualitätsziele oder Leistungsziele, erfolgen. Zum anderen besteht die Möglichkeit, die horizontale Zielordnung nach der Operationalität der Ziele zu bestimmen (**Bild 39**).
Wie bereits erklärt, werden in dieser Arbeit nur technisch relevante Ziele angesprochen. Da hiermit eine deutliche Einschränkung hinsichtlich der funktionalen Zielinhalte vorgenommen wurde, ist die Anwendung des horizontalen Ordnungsmerkmals nach funktionalen Zielinhalten nur eingeschränkt

möglich. Problematisch ist weiterhin, dass einigen Zielen ein objektiver Bewertungsmaßstab zugrunde gelegt werden kann, während andere Ziele aufgrund der subjektiven Präferenzstruktur der Entscheidungsperson bewertet werden müssen (Kap 2.3; 2.4; 2.5 und 2.6). Die möglichen horizontalen Ordnungsmerkmale sind daher nur eingeschränkt anwendbar. Da sowohl die maschinentechnischen Kriterien untereinander als auch die maschinentechnischen mit den betontechnologischen Kriterien zueinander in wechselseitiger Abhängigkeit stehen, muss es die horizontale Ordnung einerseits ermöglichen, die Kriterien jeweils auf ihre Vollständigkeit hin zu überprüfen, andererseits muss darauf geachtet werden, dass Kriterien derselben Zielsetzung nicht mehrmals in das Zielsystem einbezogen werden. Deshalb ist die horizontale Ordnung nach sachlichem Zielbezug so zu gestalten, dass innerhalb der Zielstränge keine Überschneidungen vorkommen.

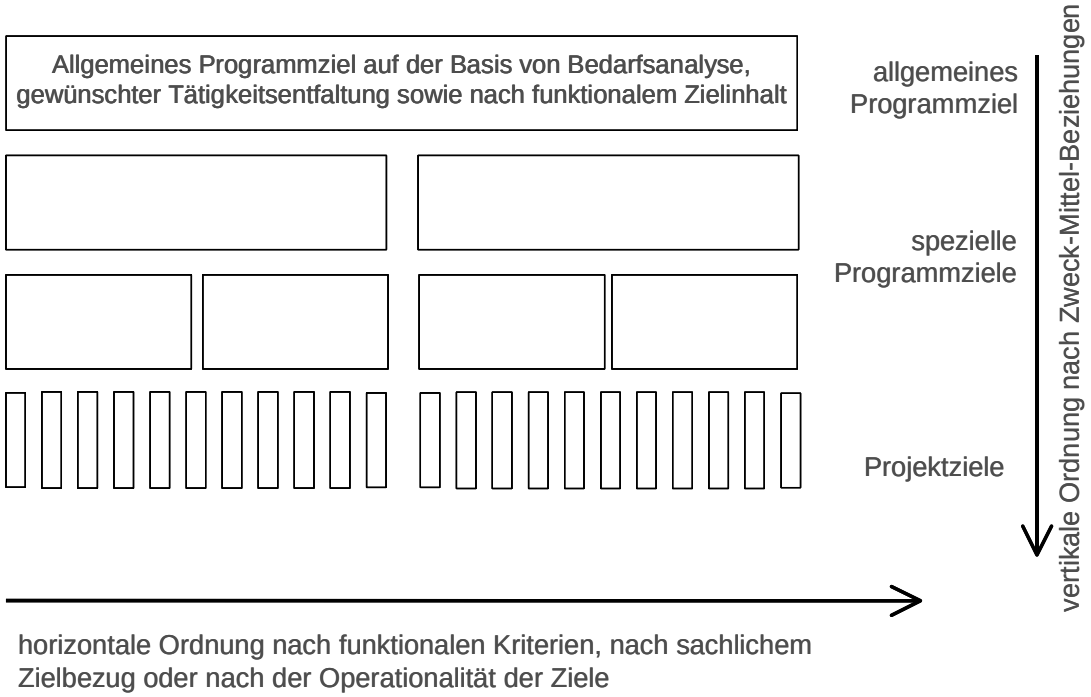

Allgemeines Programmziel auf der Basis von Bedarfsanalyse, gewünschter Tätigkeitsentfaltung sowie nach funktionalem Zielinhalt
allgemeines Programmziel
spezielle Programmziele
Projektziele
vertikale Ordnung nach Zweck-Mittel-Beziehungen
horizontale Ordnung nach funktionalen Kriterien, nach sachlichem Zielbezug oder nach der Operationalität der Ziele

Bild 39: Zielsystemstruktur (nach [134])

7.2.3 Interdependenzen

Die Untergliederung des allgemeinen Programmzieles in spezielle Programmziele und Projektziele hat zur Folge, dass auftretende Interdependenzen zwischen einzelnen Projektzielen bei der Bewertung getrennt beurteilt werden müssen. Um für das Gesamtproblem eine befriedigende Lösung erarbeiten zu können, müssen die Projektziele zunächst formal strikt isoliert und einzeln zugeordnet werden.
Es gibt die folgenden Beziehungen zwischen unterschiedlichen Zielen:

- Zwischen zwei Zielen ist eine *Zielkonkurrenz* gegeben, wenn mit dem Nutzenzuwachs des einen Zieles eine Nutzenabnahme beim anderen Ziel verbunden ist. Zielkonkurrenz ist die eigentliche Ursache von Entscheidungskonflikten. Die stärkste Form der Zielkonkurrenz, ist gegeben, wenn sich die Ziele gegenseitig ausschließen, d.h. ein Ziel nur erreicht werden kann, wenn das andere nicht erreicht wird (Kemper [39]).
- *Zielkomplementarität* zwischen zwei Zielen ist gegeben, wenn mit dem Nutzenzuwachs bei einem Ziel ein Nutzenzuwachs bei einem anderen Ziel verbunden ist - und umgekehrt.

- Eine *Zielindifferenz* liegt vor, wenn weder Zielkonkurrenz noch Zielkomplementarität alleine vorliegen.

Die genannten Zielbeziehungen können unterschiedliche Qualitäten haben. **Bild 40** verdeutlicht steigende, konstante oder abnehmende Zielbeziehungen.

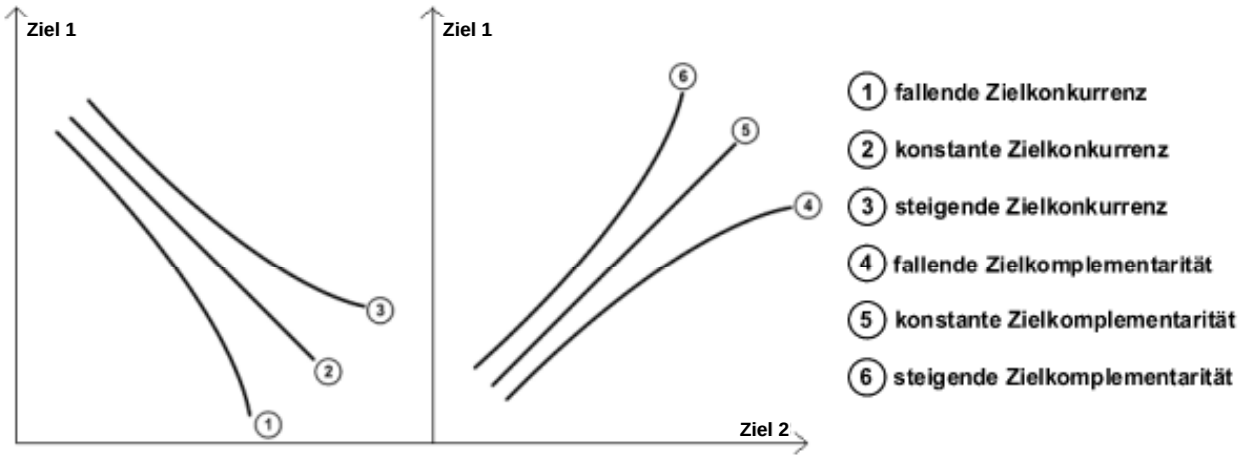


Bild 40: Darstellung der Zielbeziehungen (nach [134])

7.3 Bewertung

Die Bewertung innerhalb der Nutzwertanalyse besteht aus zwei Teilen: Zum einen müssen die zur Wahl stehenden Projektziele eingestuft werden. Hierfür wird jedem Zielkriterium durch die Entscheidungsperson ein - subjektiver - Zielwert zugewiesen, der die relative Stellung des Zielkriteriums im Vergleich zu den übrigen Zielkriterien zum Ausdruck bringt. Aus diesem Grund kann im Rahmen dieser Arbeit nur eine exemplarische Bewertung vorgenommen werden. Des weiteren muss festgestellt werden, welchen Zielwert die jeweils betrachtete Alternative bezüglich des vorgegebenen Projektzieles erreicht, die sog. Wertsynthese (Kap 7.3.4).

Die Bewertung kann nach drei unterschiedlichen Skalierungen mit mehreren Unterarten erfolgen, die in den nachfolgenden Unterkapiteln näher dargestellt werden.

- Nominalskalierung:
  - kategoriale Urteile
- Ordinale Skalierung
  - Rangordnungsverfahren
  - vollständiger Paarvergleich
- Kardinale Skalierung
  - direkte Intervallskalierung
  - indirekte Intervallskalierung mit der Transformation von vollständigen Rangteilen
  - indirekte Intervallskalierung mit der Transformation von binären Vorzugshäufigkeiten mit Hilfe des Gesetzes vom komparativen Urteil
  - indirekte Intervallskalierung mit der Transformation von binären Vorzugshäufigkeiten mit Hilfe des Gesetzes vom kategorialen Urteil
  - Verhältnisskalierung durch Verhältnisherstellung
  - Verhältnisskalierung durch direkte Verhältnisschätzung
  - Verhältnisskalierung mit Hilfe der Methode der sukzessiven Vergleiche

7.3.1 Nominale Skalierung

Im Vergleich zu den anderen Formen ist eine Bewertung nach einer nominalen Skala die schwächste Form der Skalierung. Von der Urteilsperson werden lediglich kategoriale Urteile verlangt. Hierbei ist festzustellen, ob das betrachtete Kriterium in eine vorgegebene dimensionslose Klasse eingestuft werden kann oder nicht. Bei der praktischen Anwendung der Nutzwertanalyse wird das Urteil zumeist allein anhand eines dualen Ordnungsschemas, d.h. die Gleichheit oder Verschiedenheit der Nutzenwerte, getroffen. Eine Differenzierung in zwei Klassen kann z. B. sein, ob das betrachtete Kriterium das Ziel “gut” oder “schlecht” erfüllt, oder nur “erfüllt” oder “nicht erfüllt” u.s.w.. Zweifellos liegt der Vorteil der nominalen Bewertung in der schnell vorzunehmenden Einstufung, da nur kategoriale Angaben verlangt werden. Diese Einstufung der Alternativen liefert eine “erste Näherung”. Für die Zielsetzung der Arbeit, eine Entscheidungshilfe für den Aufbau einer Restbeton-Recyclinganlage zu entwickeln, ist die nominale Skalierung allerdings zu grob und ungenau. Komplexe Wirkungszusammenhänge lassen sich mit ihr nicht bewerten. Aus diesem Grund wird auf eine weitere Beschreibung der Nominalskalen verzichtet.

7.3.2 Ordinale Skalierung

Wird die Bewertung der Alternativen nicht nur wie bei der Nominalskala auf der Basis von “Gleichheit” und “Verschiedenheit” getroffen, sondern soll auch eine Aussage über die, allerdings nicht näher quantifizierbare, Richtung von Nutzenunterschieden ermöglicht werden, erfolgt die Bewertung mittels einer Ordinalskala. Bei der Ordinalskala gibt der Vergleich zweier Zielerträge Aufschluss darüber, ob ein Wert dem anderen vorzuziehen ist, nicht jedoch in welchem Ausmaß. Als Beispiel kann die Mohs’sche Härteskala angeführt werden. Um vergleichbare Alternativen in eine Rangreihe n-ter Ordnung zu bringen, sind zwei Verfahrensweisen üblich, das Rangordnungsverfahren und das Verfahren des vollständigen ordinalen Paarvergleiches.

Beim Rangordnungsverfahren werden sämtliche Alternativen gleichzeitig bewertet. Die Bewertungsaufgabe besteht darin, die Alternativen entsprechend der Präferenzen der Urteilsperson in Hinblick auf die Projektziele vollständig in das Urteilsschema einzuordnen. Die mit dem höchsten Zielwert eingeschätzte Alternative wird mit Rang 1 belegt, die mit dem zweithöchsten Zielwert eingeschätzte Alternative mit Rang 2 u.s.w.. Diese Bewertungstechnik wird solange angewendet, bis alle Alternativen mit Rängen belegt sind. Damit dieses Verfahren angewandt werden kann, muss zuvor ein Urteilsschema hergeleitet werden. Hierzu wird aufbauend auf der Beschreibung und Einordnung der Projektziele eine Zielwertmatrix aufgestellt. Bei der Auswahl und Präzisierung der Projektziele ist im Hinblick auf die Beschreibung und Bewertung der Konsequenzen die Art ihrer Messung festzulegen (Operationalisierung). In komplexen Entscheidungssituationen ist das Rangordnungsverfahren allerdings nur sehr begrenzt sinnvoll, da zu viele Alternativmöglichkeiten vorhanden sind, und die Urteilsperson keine eindeutige Einordnung nach ihren Präferenzen mehr geben kann. Diese Methode scheidet also für den hier betrachteten Fall einer Recyclinganlage für Restbeton aus.

Beim vollständigen Paarvergleich wird dagegen keine gleichzeitige Einschätzung vorgenommen. Vielmehr werden die einzelnen Projektziele und die zur Verfügung stehenden Alternativen mit Hilfe

von $\binom{n}{2}$ binären Ordinalurteilen miteinander verglichen und bewertet. Je größer die Komplexität der Bewertungsaufgabe wird, umso mehr steigt die Gefahr einer Beurteilung in zirkuläre Triaden. Urteilt die Entscheidungsperson z. B. $A_3 > A_1$, $A_2 > A_3$, $A_1 > A_2$ lässt sich eine eindeutige Rangreihe nicht mehr angeben. Da die Entscheidungssituation für den Bau einer Recyclinganlage für Restbeton komplex ist, kann das Auftreten von zirkulären Triaden bei einer Nutzwertanalyse mittels des vollständigen Paarvergleichs nicht verhindert werden. Dies würde allerdings den Sinn einer Nutzwertanalyse für diese Entscheidungssituation in Frage stellen. Daher ist der vollständige Paarvergleich als Methode zur Bearbeitung der hier vorliegenden Problemstellung nicht sinnvoll.

7.3.3 Kardinale Skalierung

Die Kardinalskalen stellen die vergleichsweise stärkste Form der Skalierung dar. Nutzenunterschiede zwischen den Rängen lassen sich genau definieren. Hierbei kann noch danach unterschieden werden, ob der Nullpunkt der Skala fixiert (Verhältnisskala) oder variabel (Intervallskala) ist. Intervallskalen messen die äquidistanten Nutzenunterschiede. Als Beispiel kann hier die Temperaturmessung angeführt werden.

Für die Abbildung eindimensionaler Präferenzordnungen auf Intervallskalen sind zwei methodische Ansätze von praktischer Bedeutung und zwar die sogenannte direkte und die indirekte Intervallskalierung. Bei der direkten Intervallskalierung werden die Skalenwerte durch quantitative Angaben - zumeist eine Zahlenfolge - direkt angegeben. Jedem Urteil soll derselbe, jedoch willkürliche Skalenursprung und dieselbe Skaleneinheit zugrunde liegen. Für die Wertzuordnung nach dieser Methodik ist auch die Bezeichnung “rating” üblich geworden. Es handelt sich dabei um nichts anderes als z. B. das Vergeben von Zensuren wie bei der Benotung von Schulleistungen. Die Entscheidungssituation im vorliegenden Fall umfasst jedoch auch nicht quantifizierbare Kriterien, die die Anwendung einer direkten Skalierung nicht ermöglichen.

Mit der Methode einer indirekten Intervallskalierung werden die Präferenzreaktionen mittels eines ordinalen Urteilsschemas lokalisiert und mit Hilfe von Transformationsfunktionen (Gesetz vom komparativen bzw. kategorialen Urteil) in empirisch relevante Werte einer Intervallskala überführt. Diese Transformation kann anhand einer vollständigen Rangreihe oder anhand von binären Vorzugshäufigkeiten erfolgen. Zwar ist bei Anwendung der Methode einer indirekten Intervallskalierung mittels der Transformation von vollständigen Rangreihen keine Gefahr gegeben, dass Inkonsistenzen entstehen, weil die Präferenzreaktionen nur auf einem ordinalen Urteilsschema widergegeben werden. Allerdings ist die bei der praktischen Anwendung dieses Verfahrens notwendige Unterstellung von äquidistanten Nutzenunterschieden für die Entscheidungssituation “Restbetonrecycling” unbefriedigend. Daher wird das Verfahren der indirekten Intervallskalierung mit der Transformation von vollständigen Rangreihen nicht angewendet.

Über die äquidistanten Nutzenunterschiede hinaus zeichnen sich Verhältnisskalen durch einen fixierten Nullpunkt aus. Als Beispiel kann hier die Längen- oder Gewichtsmessung dienen. Bei der Bewertung wird unterstellt, dass die Urteilsperson in der Lage ist, die Unterschiede zwischen den Alternativen subjektiv wahrzunehmen und durch Zahlen so abzubilden, dass operationale Bewertungsunterschiede entstehen. Hierbei sind drei Vorgehensweisen möglich:

Die Verhältnisskalierung durch Verhältnisherstellung setzt voraus, dass die Zielerträge durch eine physikalische Einheit beschrieben werden können. Da dies beim Restbetonrecycling nicht durchgängig der Fall ist, kann das Verfahren innerhalb der Arbeit nicht verwendet werden.
Bei der Verhältnisskalierung durch direkte Verhältnisschätzung ist die Gefahr, dass Inkonsistenzen entstehen, ähnlich wie bei den binären Ordinalurteilen, sehr groß. Aus diesem Grund wird auch dieses Verfahren nicht angewendet.
Die Verhältnisskalierung mit Hilfe der Methode der sukzessiven Vergleiche berücksichtigt Nutzenunterschiede durch die Ermittlung von nutzenabhängigen Kriteriengewichten. Zwar muss auch hier die Urteilsperson ihre Präferenzreaktion auf einem kardinalen Urteilsschema lokalisieren. Die Ausprägungen der Reaktion werden allerdings durch die gesteuerte Ermittlung von Kriteriengewichten quantifiziert und können abgebildet werden. Da auch die Ermittlung der Kriteriengewichte subjektiven Einflüssen unterliegt, kann diese ebenfalls nur exemplarisch abgebildet werden. Für die vorliegende Entscheidungssituation bietet sich die Anwendung dieser Methode an.
Nach der Aufstellung des Zielsystems kann das Verfahren der sukzessiven Vergleiche dazu genutzt werden, die Kriteriengewichtung vorzunehmen. Das Zielsystem für die vorliegende Entscheidungssituation kann in Form einer Hierarchie entwickelt werden. Dies macht die Methode der sukzessiven Vergleiche einfach und übersichtlich. Die Anzahl der zu vergleichenden Gewichte bleibt klein, da jeweils nur die einem Knotengewicht untergeordneten Ziele gegeneinander nach folgendem Schema gewogen werden müssen:

- 1. Schritt

  Die Zielkriterien k_i werden in eine ordinale Präferenzordnung gebracht, so dass man beispielsweise für die Gewichte $g_i=PR(k)_i$ folgende Aussage erhält:

  $g_1 > g_2 > ..... g_i > ..... g_m$ **(Gl. 16)**

- 2. Schritt

  Die numerisch zugeordneten Gewichte g_i, i = 1(1)m werden sukzessive jeweils einzeln mit den benachbarten Gewichten verglichen. Falls das ursprünglich zugeordnete Gewicht der ersten Einschätzung nicht mehr entspricht, muss entweder g_i selbst oder es müssen die benachbarten Gewichte korrigiert werden.

- 3. Schritt

  Sind sämtliche Gewichte entsprechend Schritt 2 überprüft und gegebenenfalls korrigiert worden, müssen die Projektziele so normiert werden, dass ihre Summe eins ergibt, d. h.

  $$g_i' = g_i \left(1 \Big/ \sum_{i=1}^{m} g_i \right)$$ **(Gl. 17)**

Wenn das Zielsystem nicht in Form einer Hierarchie entwickelt werden kann, werden die vorgenannten drei Schritte mit sämtlichen Projektzielen direkt durchgeführt.

7.3.4 Wertsynthese

Erfolgt die Gewichtung der Projektziele mit Hilfe der Methode der sukzessiven Vergleiche, ergeben sich zunächst gewichtete Projektziele. Die Rangreihen, die sich als Ergebnis des Rangordnungsverfahrens ergeben, müssen dann mittels einer Wertsynthese zu einem Nutzwert zusammengefasst werden.

Es sind vier Regeln zur Wertsynthese von ordinalen Präferenzordnungen hergeleitet worden. Drei dieser Regeln (Copeland-Regel, Austin-Slight-Regel, Thurstone-Regel) bestimmen zunächst sogenannte Vorzugshäufigkeiten, um zu einem Nutzwert zu gelangen. Bei Anwendung der vierten Regel (Rangordnungssummenregel) werden die Rangplätze direkt summiert und das Resultat (die Rangsumme) als Nutzwert definiert. Nach Zangemeister führen alle vier Regeln zu dem gleichen Ergebnis: "Vergleicht man die Rangordnungssummenregel mit der Austin-Slight-Regel, so zeigt sich, dass beide Regeln zu Nutzwerten N_h führen, die bis auf eine additive Konstante m übereinstimmen. Praktisch ist es daher egal, ob man zunächst die Vorzugshäufigkeiten bestimmt und diese zu Nutzwerten addiert, oder ob man die Ränge einer Alternative zu Nutzwerten summiert" [134]. Aus diesem Grund wird die Rangordnungssummenregel zur Wertsynthese herangezogen.

Um die Nutzwerte der Alternativen nach der Rangordnungssummenregel zu berechnen, addiert man zeilenweise die Ränge in der Zielertragsmatrix:

$$\sum_{j=1}^{m} R_{hj} \qquad \textbf{(Gl. 18)}$$

So wird eine vollständige Bewertung der Alternativen ermöglicht.

Die Rangordnungssummenregel impliziert, dass die Nutzendistanzen zwischen den benachbarten Rängen gleich groß sind. Die Wertsynthese der ordinalen Rangreihen setzt voraus, dass den Rangplätzen eine vergleichbare Werteinheit zugrunde liegt, da die Rangplätze gegenseitig "verrechnet" werden. Diese ist durch die Ermittlung von Zielgewichten auf der Basis der Präferenzstruktur der Urteilsperson gegeben.

8. Nutzwertanalytische Auswertung

Die bisher besprochenen Grundlagen, die hergeleiteten Dimensionierungsansätze sowie die Ergebnisse der Versuchsreihe werden im folgenden mit der in Kapitel 7 beschriebenen Nutzwertanalyse praktisch angewandt.

- 1. Schritt Aufstellen des Zielsystems
- 2. Schritt Zusammenstellung der Projektziele
- 3. Schritt Bestimmung der Zielwertmatrix inklusive Zielgewichtung und Wertsynthese

8.1 Aufstellung des Zielsystems

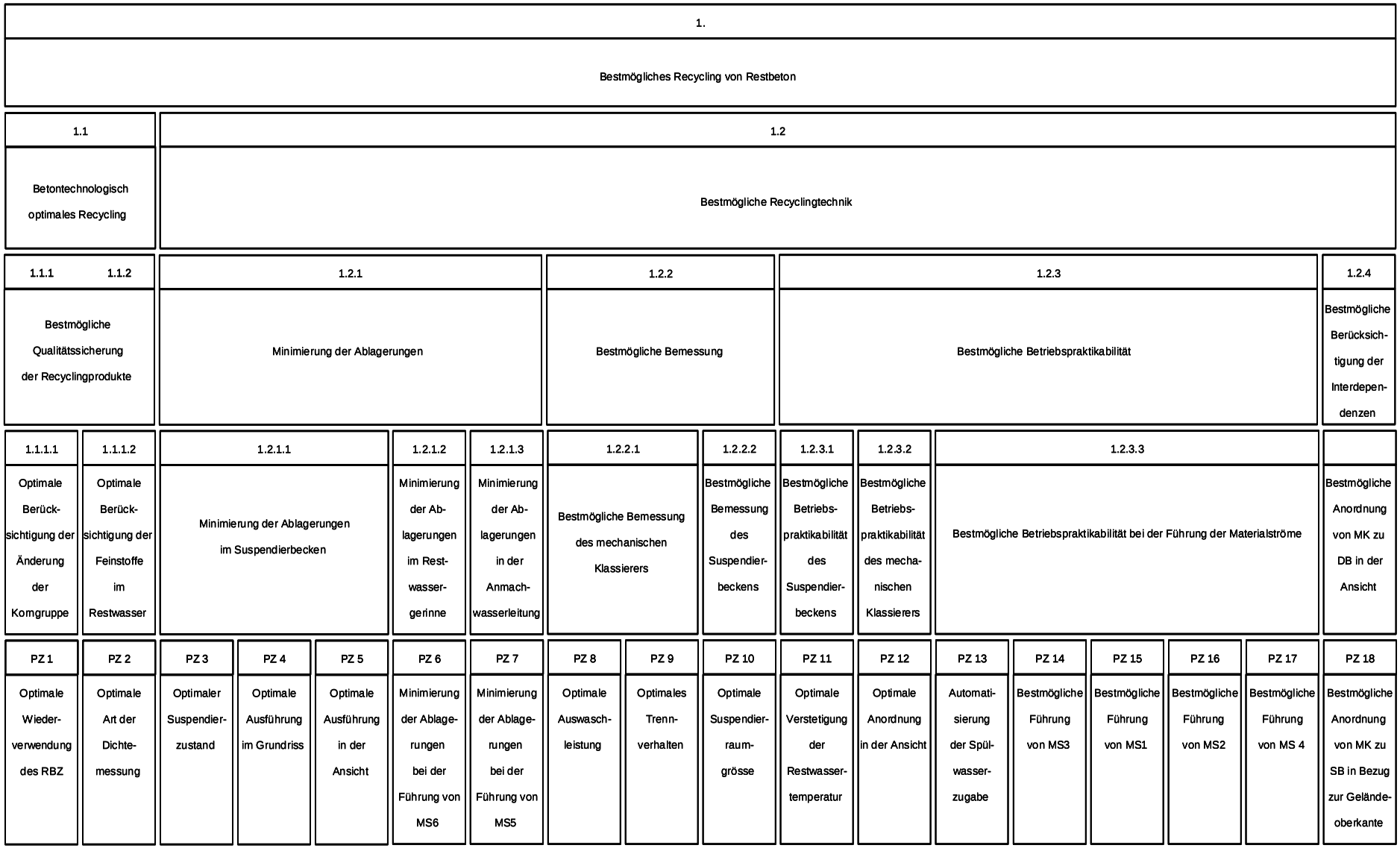
Das allgemeine Programmziel und damit oberste Zielsetzung im Rahmen dieser Arbeit ist das bestmögliche Recycling von Restbeton.
Die weitere vertikale Ordnung des allgemeinen Programmzieles wird auf der Basis der hierzu in sachlichem Bezug stehenden technischen Kriterienkomplexe “Recyclingtechnik” und “Betontechnologie” vorgenommen.
Der Kriterienkomplex “Betontechnologie” kann im weiteren in die Bereiche Restbetonzuschlag und Restwasser gegliedert werden. Hieraus lassen sich zwei Projektziele entwickeln. Der Kriterienkomplex "Recyclingtechnik” kann im weiteren in die Bereiche Ablagerungen, Bemessung, Betriebspraktikabilität und Interdependenzen gegliedert werden. Der Bereich Ablagerungen bezieht sich auf Ablagerungen im Suspendierbecken sowie auf Ablagerungen bei der Führung der Materialströme. Hieraus lassen sich fünf weitere Projektziele entwickeln. Der Bereich Bemessung bezieht sich auf die Bemessung des mechanischen Klassierers sowie des Suspendierbeckens. Hieraus lassen sich drei weitere Projektziele entwickeln. Der Bereich Betriebspraktikabilität bezieht sich auf die Betriebspraktikabilität des Suspendierbeckens, des mechanischen Klassierers sowie der Führung der Materialströme. Hieraus lassen sich sieben weitere Projektziele entwickeln.
In **Bild 41** ist das Zielsystem dargestellt. Es wird deutlich, dass keine Überschreitungen vorkommen und eine widerspruchsfreie Formulierung sowie die Vermeidung von Mehrfachnennungen sichergestellt wurde.

8.2 Zusammenstellung der Projektziele

Die einzelnen Projektziele werden nach folgendem Schema besprochen:

- Bezug zu den Grundlagen
- Formulierung des Projektziels
- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix
- Aussagen zur Operationalität
- Exemplarische Bewertung
- Exemplarische Gewichtung
- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde

Bild 41: Zielsystem beim Restbetonrecycling



Die Bewertung und Gewichtung der Projektziele wird grundsätzlich durch die Entscheidungsperson aufgrund ihrer persönlichen Präferenzstruktur selbst vorgenommen. Eine allgemeingültige Präferenzstruktur steht nicht zur Verfügung. Trotzdem soll zur Verdeutlichung des Entscheidungsverfahrens im Rahmen dieser Arbeit eine exemplarische Bewertung und Gewichtung der Projektziele vorgenommen werden. Um ein praxisnahes Beispiel zu wählen, wird die von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde (vgl. **Bild 2** und **Bild 3**) im Rahmen dieser Arbeit bewertet und gewichtet.

8.2.1 Qualitätssicherung der Recyclingprodukte

Projektziel 1: Optimale Wiederverwendung des Restbetonzuschlags

- Bezug zu den Grundlagen
  Im Kap. 2.3.1 wurden fünf Methoden der Betonproduktion mit Restbetonzuschlag dargelegt. Die zweite Methode ist nicht zulässig und die fünfte Methode hat nicht das Restbetonrecycling zum Ziel. Aus diesem Grund werden diese beiden Methoden nicht berücksichtigt.
- Formulierung des Projektziels
  Die Wiederverwendung des Restbetonzuschlags soll so erfolgen, dass die Höchstgrenzen bzw. Tiefstgrenzen für Ober- und Unterkorn der DIN 4226 eingehalten werden.
- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 10: Varianten bei der Verwendung des Restbetonzuschlages

Zielkriterien	Varianten (vgl. S. 11)	Vorteile	Nachteile
Änderung der Korngruppe	weitere Klassierung	- Überschreitung der Grenzwerte für Ober- und Unterkorn ausgeschlossen	- Zusätzliche technische Ausstattung - ggf. zusätzliche Fracht
	volumetrisches Abschätzen	keine	- fehlerbehaftet - Überschreitung der Grenzwerte für Unter- und Oberkorn kann vorkommen
	getrenntes Lagern und Dosieren	- Überschreitung der Grenzwerte für Ober- und Unterkorn sehr unwahrscheinlich	- Aktivlager geht verloren

- Aussagen zur Operationalität
  Das Projektziel 1 lässt sich quantifizieren. Der Vergleich der IST-Sieblinie des mit Restbetonzuschlag hergestellten Betons mit den Grenzwerten der DIN 4226 ermöglicht eine Aussage, ob die Norm eingehalten wurde oder nicht.
- Exemplarische Bewertung
  Gemessen am Projektziel werden die drei Varianten wie folgt bewertet:
  - Weitere Klassierung - gut
  - Getrenntes Lagern und Dosieren - befriedigend
  - Volumetrisches Abschätzen - schlecht

- Exemplarische Gewichtung

  Eine Nichteinhaltung der Grenzwerte kann die Qualität des mit Restbetonzuschlags hergestellten Betons beeinträchtigen. Aus diesem Grund handelt es sich aus der Sicht des Verfassers um ein bedeutendes Projektziel.

  Die Beispiel-Nutzwertanalyse wird durchgeführt mit g_1 = 12 % (vgl. **Bild 42**, S. 95).

- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde

  Hier erfolgt die Bevorratung des Aktivlagers für Betonzuschlag in bis zu zwölf Kammern eines Stahlbeton-Doseurs. Da nur bis zu neun Lieferkörnungen verarbeitet werden, hat es sich hier angeboten, die Variante des getrennten Lagerns und Dosierens durchzuführen.

Projektziel 2: Optimale Art der Dichtemessung

- Bezug zu den Grundlagen

  Im Kap. 2.3 wurden zwei grundlegende Dichtemessvarianten erläutert. Zum einen die automatische Dichtemessung, z. B. radiometrisch, wobei die Messwerte online bei der Produktion der neuen Betonmischung berücksichtigt werden. Zum anderen die händische Dichtemessung, die mit dem Aräometer oder dem Pyknometer durchgeführt werden kann.

- Formulierung des Projektziels

  Die Art der Dichtemessung und die Berücksichtigung der Messwerte soll so erfolgen, dass die Grenzwerte für Mehlkorn und Feinsand der DIN 1045 in der neuen Betonmischung eingehalten werden.

- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 11: Varianten bei der Art der Dichtemessung

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Berücksichtigung der Feinstoffe	händisch mit Aräometer	keine	- offline - geringe Genauigkeit
	händisch mit Pyknometer	- hohe Genauigkeit	- offline
	automatisch z. B. radiometrisch	- online - hohe Genauigkeit	- zusätzliche technische Ausstattung

- Aussagen zur Operationalität

  Das Projektziel 2 lässt sich quantifizieren. Der Vergleich des IST-Mehlkorngehaltes des mit Restwasser hergestellten Betons mit den Grenzwerten der DIN 1045 ermöglicht eine Aussage, ob die Norm eingehalten wurde oder nicht.

- Exemplarische Bewertung

  Gemessen am Projektziel werden die drei Varianten wie folgt bewertet:

  - Händisch mit Aräometer - schlecht
  - Händisch mit Pyknometer - befriedigend
  - Automatisch - gut

- Exemplarische Gewichtung

  Eine Überschreitung des zulässigen Mehlkorngehaltes durch Feinstoffe aus dem Restwasser kann die Qualität des mit Restwasser hergestellten Betons wesentlich beeinträchtigen. Aus diesem Grund handelt es sich aus der Sicht des Verfassers um ein sehr bedeutendes Projektziel.

  Die Beispiel-Nutzwertanalyse wird durchgeführt mit $g_2 = 28{,}0$ % (vgl. **Bild 42**, S. 95).

- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde

  Wie schon erläutert, ist die Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde mit einem automatisch arbeitenden radiometrischen Dichtemessgerät ausgestattet, das mit der Anlagensteuerung online verbunden ist.

8.2.2 Minimierung der Ablagerungen

Projektziel 3: Optimaler Suspendierzustand

- Bezug zu den Grundlagen

  Im Kap. 5.3. wurde erläutert, wie der Suspendierzustand die Ablagerungsneigung der Feinstoffe beeinflusst.

  Für den Fall, dass das Suspendierkriterium “vollständige Suspension” erreicht ist, wird sichergestellt, dass die Feinstoffe im Restwasser homogen verteilt sind und sich nicht am Grund des Suspendierbeckens absetzen und erhärten. Wird eine vollständige Suspension nicht erreicht, ist die homogene Verteilung der Feinstoffe im Restwasser nicht sichergestellt. Am Beckenboden bildet sich mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Ablagerungsschicht, die im Laufe der Zeit erhärtet. Je nach Ablagerungsneigung der Feinstoffe muss diese Schicht in unterschiedlichen Zeitabständen ausgebaut und entsorgt wird. Für den Zeitraum des Ausbaus steht die Recyclinganlage nicht für den Betrieb zur Verfügung.

- Formulierung des Projektziels

  Die maschinentechnischen Apparate am Suspendierbecken sollen so bemessen sein, dass der Zustand der homogenen Suspension mit minimalem Aufwand erreicht wird.

- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 12: Varianten bezüglich des Suspensionszustandes im Suspendierbecken

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Optimaler Suspendier-zustand	vollständige Suspension erreicht	- geringe Ablagerungen im Suspendierbecken	keine
	keine vollständige Suspension	keine	- Ablagerungen im Suspendierbecken - häufige Stehzeiten der Recyclinganlage

- Aussagen zur Operationalität

  Projektziel 3 kann nur zum Teil quantifiziert werden. Es ist evident, dass bei einer vollständigen Suspension Ablagerungen am Grund des Suspendierbeckens minimiert werden. Allerdings ist keine genaue Aussage darüber möglich, in welchen Umfang eine teilweise Suspension erreicht wird.

- Exemplarische Bewertung

  Gemessen am Projektziel werden die zwei Varianten wie folgt bewertet:

  - Vollständige Suspension erreicht - gut
  - Vollständige Suspension erreicht ohne Überprüfung der Rührleistung - befriedigend
  - Vollständige Suspension nicht erreicht - schlecht

- Exemplarische Gewichtung

  Die Reinigung der Suspendierbecken von Feststoffen aus dem Restwasser ist sehr arbeitsintensiv und zeitaufwendig. Aus Sicht des Verfassers handelt es sich im Rahmen der Ablagerungskriterien um ein bedeutendes Projektziel.

  Die Beispiel-Nutzwertanalyse wird durchgeführt mit $g_3 = 5$ % (vgl. **Bild 42**, S. 95).

- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde

  Wie in der Praxis üblich, wurde vor Inbetriebnahme der Anlage eine suspendiertechnische Bemessung nicht durchgeführt. Die Leistung der Rührwerksmotoren beträgt jeweils 5,5 kW. Als Rührorgane werden Schrägblattrührer mit 2,0 m Durchmesser eingesetzt. Da es in den ersten sechs Betriebsjahren nicht zu nennenswerten Ablagerungen gekommen ist, kann davon ausgegangen werden, dass beim Suspendieren der Zustand der vollständigen Suspension erreicht wird. Eine Überprüfung, ob dies möglicherweise mit überdimensionierter Rührleistung "erkauft" wurde, ist nicht durchgeführt worden, da die beiden Konstanten N_v und K für diesen Rührertyp nicht bekannt sind.

Projektziel 4: Optimale Ausführung der Suspendierbecken im Grundriss

- Bezug zu den Grundlagen

  Im Kap. 5.2.1 wurde der Einfluss von Totzonen auf die Ablagerungsneigung beschrieben.

- Formulierung des Projektziels

  Das Suspendierbecken soll im Grundriss so ausgeführt sein, dass eine Minimierung der Ablagerung erreicht wird.

- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 13: Ausführung der Suspendierbecken im Grundriss

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Optimale Ausführung der Suspendierbecken im Grundriss	Rund ohne Stromstörer	- geringe Ablagerungsneigung	- Mitrotieren des Restwassers
	Rund mit Stromstörer	- zusätzlicher Suspendiereffekt	- Ablagerungen in Totzonen
	Rechteckig	- vorhandene Anlagen können genutzt werden - zusätzlicher Suspendiereffekt	- Ablagerungen in Totzonen

- Aussagen zur Operationalität

  Das Projektziel 4 ist nur zum Teil quantifizierbar. Zwar beeinflusst die Ausführung des Suspendierbeckens im Grundriss die Ablagerungsneigung der Feinstoffe an den Innenwänden. Eine Aussage darüber, in welchem Umfang dies geschieht, ist jedoch nicht möglich.

- Exemplarische Bewertung

  Gemessen am Projektziel werden die drei Varianten wie folgt bewertet:

  - rund ohne Stromstörer - gut
  - rund mit Stromstörer - befriedigend
  - rechteckig - schlecht

- Exemplarische Gewichtung

  Im Vergleich zu Projektziel 3 scheint der Einfluss auf die Ablagerungsneigung etwas geringer.
  Die Beispiel-Nutzwertanalyse wird durchgeführt mit $g_4 = 2{,}5$ % (vgl. **Bild 42**, S. 95).

- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde

  Die Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde ist mit zylindrischen Suspendierbecken ohne Stromstörer ausgestattet.

Projektziel 5: Optimale Ausführung der Suspendierbecken in der Ansicht

- Bezug zu den Grundlagen

  Im Kap. 5.1 wurde der Einfluss von Totzonen auf die Ablagerungsneigung beschrieben.

- Formulierung des Projektziels

  Das Suspendierbecken soll in der Ansicht so ausgeführt werden, dass die Ablagerung an den Innenwänden des Suspendierbeckens minimal bleiben.

- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 14: Varianten bezüglich der Ausführung in der Ansicht

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Optimale Ausführung der DB in der Ansicht	Flachboden	- vorhandene Anlagen können genutzt werden	- Ablagerungen, da Anpassung an das Strömungsbild nicht gut möglich ist
	Klöpperboden	- wenig Ablagerungen, da Anpassung an das Strömungsbild möglich ist	keine
	Kugelboden	- wenig Ablagerungen, da Anpassung an das Strömungsbild möglich ist	keine

- Aussagen zur Operationalität

  Hier gelten die zu Projektziel 4 gemachten Aussagen.

- Exemplarische Bewertung

  Gemessen am Projektziel werden die drei Varianten wie folgt bewertet:

  - Flachboden - schlecht
  - Klöpperboden - befriedigend

- Kugelboden - gut

- Exemplarische Gewichtung
  Hier gelten die zu Projektziel 4 gemachten Aussagen.
- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde
  Die Suspendierbecken der Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde sind mit Flachboden ausgestattet.

Projektziel 6: Minimierung der Ablagerungen bei der Führung von MS_6 (Restwasser aus dem mechanischen Klassierer)

- Bezug zu den Grundlagen
  Im Kap. 3.3.1 wurden die zwei grundsätzlichen Methoden, den Materialstrom zu führen, beschrieben.
- Formulierung des Projektziels
  Der Materialstrom MS_6 soll so geführt werden, dass sich ein Minimum an Ablagerungen ergibt.
- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 15: Varianten zur Führung des Materialstromes MS_4

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Optimale Minimierung der Ablagerungen bei der Führung des Materialstromes MS_4	positives Gefälle	- ohne Maschinentechnik zu realisieren - mit größer werdendem Gefälle kleiner werdende Neigung zur Bildung von Ablagerungen	keine
	negatives Gefälle	keine	- zusätzliche Maschinentechnik erforderlich - Ablagerungen

- Aussagen zur Operationalität
  Hier gelten die zu Projektziel 4 gemachten Aussagen.
- Exemplarische Bewertung
  Gemessen am Projektziel werden die zwei Varianten wie folgt bewertet:
  - Positives starkes Gefälle - gut
  - Positives flaches Gefälle - befriedigend
  - Negatives Gefälle - schlecht
- Exemplarische Gewichtung
  Hier gelten die zu Projektziel 4 gemachten Aussagen.
- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde
  Bei der Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde sind die Suspendierbecken Unterflur und der mechanische Klassierer Überflur angeordnet. Der Materialstrom wird durch ein offenes Gerinne geführt.

Projektziel 7: Minimierung der Ablagerungen bei der Führung von MS_5 (Anmachwasser)

- Bezug zu den Grundlagen
  Im Kap. 3.2.2 wurden die vier grundsätzlichen Varianten, den Materialstrom zu führen, erläutert.
- Formulierung des Projektziels
  Die Kombination aus Dosierpumpe und Steigung der Anmachwasserleitung soll so gewählt werden, dass die Ablagerungen an den Innenwandungen der Anmachwasserleitung minimiert werden.
- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 16: Varianten bezüglich der Ausführung der Anmachwasserleitung

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Minimierung der Ablagerungen in der Anmach-Wasserleitung	Suspendierbecken nahe der Mischanlage mit Tauchpumpe	- geringe Ablagerungsneigung	keine
	Suspendierbecken nahe der Mischanlage mit Saugpumpe	- mittlere Ablagerungsneigung	keine
	Suspendierbecken fern der Mischanlage mit Tauchpumpe	- mittlere Ablagerungsneigung	keine
	Suspendierbecken fern der Mischanlage mit Saugpumpe	keine	- starke Ablage-rungsneigung

- Aussagen zur Operationalität
  Hier gelten die zu Projektziel 4 gemachten Aussagen.
- Exemplarische Bewertung
  Gemessen am Projektziel werden die vier Varianten wie folgt bewertet:
  - Suspendierbecken nahe der Mischanlage mit Tauchpumpe - gut
  - Suspendierbecken nahe der Mischanlage mit Saugpumpe - befriedigend
  - Suspendierbecken fern der Mischanlage mit Tauchpumpe - befriedigend
  - Dispergierbecken fern der Mischanlage mit Saugpumpe - schlecht
- Exemplarische Gewichtung
  Hier gelten die zu Projektziel 4 gemachten Aussagen.
- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde
  Die Suspendierbecken befinden sich in unmittelbarer Nähe zur Mischanlage. Die Förderung des Anmachwassers wird mit einer Tauchpumpe durchgeführt.

8.2.3 Bemessungen

Projektziel 8: Optimaler Auswaschdurchsatz

- Bezug zu den Grundlagen
  Im Gegensatz zu den Ausführungen im Grundlagenteil wird im Praxisteil der Begriff Auswaschleistung für den Begriff Volumendurchsatz verwendet. In der Praxis ist Auswaschleistung die übliche Bezeichnung.

Im Kap. 4.3.1 sind die Grundlagen bzgl. der Auswaschleistung erläutert worden. Die Leistungsgrößen $\dot{V}_{theo}$, $\dot{V}_{RB,kon}$ $\dot{V}_{RB,dis}$ und $\dot{V}_{soll}$ wurden hergeleitet. Die Entscheidungsperson muss die erforderliche Auswaschleistung $\dot{V}_{soll}$ definieren. Insbesondere muss angegeben werden, welcher Recyclingfall (Restbeton oder Rückbeton) maßgeblich sein soll. Zur Entscheidungshilfe wird die erforderliche Auswaschleistung $\dot{V}_{Soll}$ mit der vorhandenen Auswaschleistung $\dot{V}_{IST}$ verglichen.

- $\dot{V}_{Soll} < \dot{V}_{IST}$: Hierbei ergibt sich ein hoher Auslastungsgrad des mechanischen Klassierers. Allerdings sind Wartezeiten der Fahrmischer beim Auswaschen wahrscheinlich.
- $\dot{V}_{Soll} = \dot{V}_{IST}$: Der Auslastungsgrad des mechanischen Klassierers ist geringer. Wartezeiten sind möglich.
- $\dot{V}_{Soll} > \dot{V}_{IST}$: Der Auslastungsgrad und die Wahrscheinlichkeit von Wartezeiten sind gering.

- Formulierung des Projektziels
  Die Auswaschleistung des mechanischen Klassierers soll so bemessen sein, dass die Wartezeiten beim Auswaschvorgang minimiert und die Auslastung des mechanischen Klassierers optimiert wird.
- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 17: Varianten bezüglich der Auswaschleistung

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Optimale Auswasch-leistung	$\dot{V}_{Soll} < \dot{V}_{IST}$	- Hoher Auslastungsgrad	- Es wird zu Wartezeiten während des Auswaschprozesses kommen.
	$\dot{V}_{Soll} = \dot{V}_{IST}$	- Es kann zu Wartezeiten während des Auswaschprozesses kommen.	keine
	$\dot{V}_{Soll} > \dot{V}_{IST}$	- Es wird wahrscheinlich nicht zu Wartezeiten während des Auswaschprozesses kommen, und es sind noch Reserven vorhanden.	- Niedriger Auslastungsgrad

- Aussagen zur Operationalität
  Das Projektziel 8 ist nur teilweise quantifizierbar, da Aussagen über Wartezeiten und Auslastung wegen der Unvorhersagbarkeit des Auswaschbedarfes nur näherungsweise gemacht werden können.
- Exemplarische Bewertung
  Gemessen am Projektziel werden die drei Varianten wie folgt bewertet:
  - $\dot{V}_{Soll} < \dot{V}_{IST}$ - schlecht
  - $\dot{V}_{Soll} = \dot{V}_{IST}$ - gut
  - $\dot{V}_{Soll} > \dot{V}_{IST}$ - befriedigend

- Exemplarische Gewichtung

  Aus Sicht des Verfassers ist eine auf den Bedarf abgestimmte Auswaschleistung ein bedeutendes Entscheidungskriterium. Die Beispiel-Nutzwertanalyse wird durchgeführt mit g_8 = 9 % (vgl. **Bild 42**, S. 95).

- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde
  - Recyclingfall Restbeton

    a) t_{MB}

    Während der Versuchsreihe konnten 3600/390 = 9,2 Fahrzeugwechsel pro Stunde durchgeführt werden. Da experimentelle Werte für den praktischen Volumendurchsatz im diskontinuierlichen Betrieb $\dot{V}_{RB,dis}$ nicht vorliegen, wird der Zeitfaktor für das Leerfahren des Materialbettes t_{MB} mithilfe des arithmetrisch ermittelten theoretischen Volumendurchsatzes $\dot{V}_{theo}$ ermittelt:

    $\Rightarrow \quad \dot{V}_{theo} - \dot{V}_{RB,kon} = 5{,}35 - 4{,}6 = 0{,}75 \ (m^3/h)$

    $\Rightarrow$ Es gehen 0,75/5,35 = 14,02 % des Förderdurchsatzes durch Fahrzeugwechsel verloren.

    $\Rightarrow$ Dies entspricht 504,7s der Förderzeit in der Stunde.

    $\Rightarrow \quad t_{MB} = 504{,}7/9{,}2 = 54{,}85s$

    Kontrolle über Schneckenbaumdaten (vgl. S. 34)

    $$t^*_{MB} = \frac{5500 - 60}{17 \cdot 230} = 66{,}9s > 54{,}8s = t_{MB},$$

    weil die Feststoffe nicht über die komplette Schneckenbaumlänge gefördert werden.

    b) t_{FZ}=315s (mit einem Wassergalgen)

    mit t_E = 60s

    t_R = 90s

    t_F = 45s

    t_s = 120s

    Unter der Annahme, dass eine Rückbetoncharge 0,25m³ groß ist, beträgt die Auswaschzeit für eine Charge t_A = 390/2 = 195s. Demgemäss kann jeweils nach 315s eine Restbetoncharge ausgewaschen werden. Der Zeitfaktor t_{FZ} ist maßgebend.

    $$\Rightarrow \quad \dot{V}_{IST,RB} = \frac{3600}{315} \cdot 0{,}25 = 2{,}86\,m^3/h$$

  - Recyclingfall Rückbeton

    Die Entscheidungsperson hält es für notwendig, einen voll beladenen Vierachsfahrmischer innerhalb von zwei Stunden wieder einsatzbereit zu haben.

    $$\Rightarrow \quad \dot{V}_{SOLL,RüB} = \frac{8{,}0\,m^3}{2{,}0\,h} = 4{,}0\,m^3/h < \dot{V}_{RB,kon} = 4{,}6\,m^3/h$$

Projektziel 9: Optimales Trennverhalten

- Bezug zu den Grundlagen

  Im Kap. 4.3.2 f. wurde die Abhängigkeit von Entleerdurchsatz und Trennkorngröße sowie Feinkornanteil unter 125 µm im Restbetonzuschlag erläutert. Mit steigendem Entleerdurchsatz

steigt auch der Fehlkornanteil im Restbetonzuschlag und damit folgerichtig auch die Kornbindung. Derzeit kann der kritische Fehlkorngehalt bzw. der kritische Entleerdurchsatz, bei dem das Kornbindungskriterium der Restwasser-Richtlinie nicht mehr eingehalten werden kann, nur durch Feldversuche ermittelt werden. Witterungs- und stoffliche Einflüsse sind zu berücksichtigen.

- Formulierung des Projektziels
  Das Trennverhalten des mechanischen Klassierers in Abhängigkeit vom Entleerdurchsatz soll die Kornbindung im Restbetonzuschlag unterbinden.
- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 18: Varianten bezüglich des Trennverhaltens

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Optimales Trenn-Verhalten	Kritischer Entleerdurchsatz ermittelt	- Kornbindung unwahrscheinlich	keine
	Kritischer Entleerdurchsatz nicht ermittelt	keine	- Kornbindung möglich

- Aussagen zur Operationalität
  Das Projektziel 9 ist quantifizierbar.
- Exemplarische Bewertung
  Gemessen am Projektziel werden die beiden Varianten wie folgt bewertet:
  - EDS_{krit} ermittelt - gut
  - EDS_{krit} nicht ermittelt - schlecht
- Exemplarische Gewichtung
  Nach Meinung des Verfassers handelt es sich um ein sehr bedeutendes Projektziel. Die Beispiel-Nutzwertanalyse wird durchgeführt mit g_9 = 9 % (vgl. **Bild 42**, S. 95).
- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde
  Zu den bei den Feldversuchen gegebenen Witterungsbedingungen und den stofflichen Gegebenheiten lag die Grenze der Rieselfähigkeit bei ca. 2,3 – 2,7 % Feinkornanteil unter 125 µm im Restbetonzuschlag.

Projektziel 10: Optimale Suspendierraumgröße

- Bezug zu den Grundlagen
  Die erforderliche Größe des Suspendierraumes ist von diversen Parametern (Zu- und Abflüssen, Anforderungen) abhängig (vgl. Kap. 5.2.2). Diese Parameter können die Grundlage einer wasserwirtschaftlichen Berechnung darstellen.
- Formulierung des Projektziels
  Die Größe des Suspendierraumes soll so bemessen sein, dass alle an die Größe des Suspendierraumes gestellten Anforderungen eingehalten werden.

- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 19: Varianten bei der Größe des Suspendierraumes

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Größe des Suspendier-raumes	Wasser-wirtschaftliche Berechnung erfolgreich durchgeführt	- Reservekapazität vorhanden - Anmachwasserkapazität vorhanden - maximale Restwasserdichte wird eingehalten - Verstetigung des Suspendiereffektes	keine
	Wasser-wirtschaftliche Berechnung nicht durchgeführt	keine	Es ist nicht sichergestellt, dass: - Reservekapazität vorhanden ist, - Anmachwasserkapazität vorhanden ist, - die maximale Restwasserdichte eingehalten wird, - eine Verstetigung des Disperigereffektes erreicht wird.

- Aussagen zur Operationalität

  Das Projektziel 10 ist quantifizierbar. Mit Hilfe einer wasserwirtschaftlichen Bemessung ist eine Aussage darüber möglich, ob die Anforderungen an die Größe des Dispergierraumes eingehalten werden oder nicht.

- Exemplarische Bewertung

  Gemessen am Projektziel werden die beiden Varianten wie folgt bewertet:

  - Berechnung durchgeführt - gut
  - Berechnung nicht durchgeführt - schlecht

- Exemplarische Gewichtung

  Für den Fall, dass die Suspendierbecken zu klein dimensioniert sind, ist mit gravierenden Nachteilen bei der Verwendung von Restwasser (Restwasserdichte) sowie im Betrieb der Recyclinganlage (Überlaufen des Beckens) zu rechnen. Aus Sicht des Verfassers handelt es sich um ein bedeutendes Projektziel.

  Die Beispiel-Nutzwertanalyse wird durchgeführt mit $g_{10} = 9\ \%$ (vgl. **Bild 42**, S. 95).

- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde

  - Zu- und Abflüsse

    a) Oberflächenwasser (MS_{3a}): Fläche F = 350 m^2

    $\Rightarrow$ Wochentage (aus [106]) $r_{WT} = 15{,}5\ \frac{l}{s \cdot ha}$ für $T = 150$ min

    $= 15{,}5 \cdot 0{,}035 \cdot 150 \cdot 60$

    $= 5{,}022$ m³

    $\Rightarrow$ Wochenende (z. B. Wetteramt) $r_{WE} = 12{,}8$ m³ ($T_0 = 60$ h)

b) Flüssige Stoffe aus dem Vorklassierer (MS_{9a}): Das Oberflächenwasser wird bei der Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde über den Vorklassierer in die Suspendierbecken geleitet.

c) Restwasser aus dem mechanischen Klassierer (MS_6):
   ⇒ aus Restbeton: zu vernachlässigen, da mit Restwasser gespült wird

d) Füllstandsregelung (MS_{8a}/MS_{8b}): Sobald ein fest definierter Pegeltiefstand erreicht ist, wird automatisch (Schwimmschalter) aus dem öffentlichen Leitungsnetz Wasser in die Suspendierbecken gefördert

e) Spülwasser (MS_{7a}): zu vernachlässigen, da es nach dem Spülen dem Suspendierbecken wieder zugeführt wird.

f) Anmachwasser (MS_5): MS_5 (T:150 min) = $2{,}5\text{h} \cdot 15{,}0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 150 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} = 5{,}625\text{m}^3$

- Anforderungen

a) => r_{wt} = 5,022 m³ < MS_5 (T=150 min) = 5,625 m³
   Die Suspendierbecken müssen mindestens über die Reservekapazität verfügen, mit der sie die Regenspende eines Wochenendes aufnehmen zu können.

b) Kann bei den Rahmenbedingungen nicht sichergestellt werden.

c) Wird über Verschneidung bei Verwiegung geregelt (online).

d) Wird über Schwimmschalter geregelt.

8.2.4 Betriebspraktikabilität

Projektziel 11: Verstetigung der Restwassertemperatur

- Bezug zu den Grundlagen
  Im Kap. 5.2 ist die Gefahr des Gefrierens von Restwasser bei extremen Witterungsverhältnissen beschrieben.
- Formulierung des Projektziels
  Das Suspendierbecken soll in der Ansicht so angeordnet sein, dass das Restwasser auch bei extremen Witterungsverhältnissen nicht gefriert und das Becken funktionstüchtig bleibt.
- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 20: Varianten bezüglich der Anordnung der Suspendierbecken in der Ansicht

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Optimale Verstetigung der Restwasser-temperatur	Unterflur	- geringe Gefahr von Ausfällen im Winterbetrieb	keine
	Teilversenkt	- mittlere Gefahr von Ausfällen im Winterbetrieb	keine
	Überflur	keine	- große Gefahr von Ausfällen im Winterbetrieb

- Aussagen zur Operationalität

  Das Projektziel 11 ist nur zum Teil zu quantifizieren. Die Anordnung des Suspendierbeckens in der Ansicht beeinflusst die Neigung des Restwassers, im Winterbetrieb einzufrieren; eine Aussage darüber, in welchem Umfang dies geschieht und eine Messung der Neigung, einzufrieren, kann allerdings nicht erfolgen.
- Exemplarische Bewertung

  Gemessen am Projektziel werden die drei Varianten wie folgt bewertet:
  - Unterflur - gut
  - Teilversenkt - befriedigend
  - Überflur - schlecht
- Exemplarische Gewichtung

  Ein Durchfrieren des Restwassers ist – wenn auch sehr unwahrscheinlich – eine erhebliche Beschränkung beim Betrieb der Anlage.

  Die Beispiel-Nutzwertanalyse wird durchgeführt mit g_{11} = 3,75 % (vgl. **Bild 42**, S. 95).
- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde

  Die Suspendierbecken sind Unterflur angeordnet.

Projektziel 12: Anordnung des MK in der Ansicht

- Bezug zu den Grundlagen

  Im Kap. 4.2 sind die drei Varianten zur Anordnung des mechanischen Klassierers in Bezug zur Geländeoberkante dargestellt.
- Formulierung des Projektziels

  Der mechanische Klassierer soll diejenige Anordnung in Bezug zur Geländeoberkante haben, bei der optimale Betriebspraktikabilität gegeben ist.
- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 21: Varianten bezüglich der Anordnung des Klassierers in Bezug zur Geländeoberkante

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Optimale Betriebsprakti-kabilität des mechanischen Klassierers	Unterflur	keine	- Schwer zugänglich - Verunreinigungen - Unzureichende Abwurfhöhe
	Teilversenkt	keine	- Schwer zugänglich - Verunreinigungen - Unzureichende Abwurfhöhe
	Überflur	- leicht zugänglich - keine Verunreinigungen - ausreichende Abwurfhöhe	keine

- Aussagen zur Operationalität

  Das Projektziel 12 ist nur zum Teil quantifizierbar. Zwar sind die Vor- bzw. Nachteile nachvollziehbar, sie können allerdings nicht gemessen werden.

- Exemplarische Bewertung

  Gemessen am Projektziel werden die drei Varianten wie folgt bewertet:

  - Unterflur - schlecht
  - Teilversenkt - befriedigend
  - Überflur - gut

- Exemplarische Gewichtung

  Die beschriebenen Vor- und Nachteile stellen die Funktionstüchtigkeit der Anlage nicht in Frage.

  Die Beispiel-Nutzwertanalyse wird durchgeführt mit $g_{12} = 2$ % (vgl. **Bild 42**, S. 95).

- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde

  Der mechanische Klassierer ist Überflur angeordnet.

Projektziel 13: Automatisierung der Spülwasserzugabe

- Bezug zu den Grundlagen

  In Kap. 3.3.2 wurden die Kriterien bzgl. dieses Materialstromes erläutert.

- Formulierung des Projektziels

  Die Spülwasserzugabe sollte automatisiert (d.h. mit Voreinstellung) erfolgen.

- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 22: Varianten bei der Führung des Materialstromes MS_6

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Automatisierung der Spülwasserzugabe	Voreinstellung vorhanden	- gutes Spülergebnis - einfache Bedienung	keine
	Voreinstellung nicht vorhanden	keine	- aufwendige Bedienung - wahrscheinlich schlechtes Spülergebnis

- Aussagen zur Operationalität

  Das Projektziel 13 ist nur zum Teil quantifizierbar. Zwar ist es nachvollziehbar, dass das Spülergebnis bei einer Automatisierung verbessert und die Bedienung des Wassergalgens vereinfacht wird. Eine Aussage darüber, in welchem Umfang die geschieht, ist jedoch nicht möglich.

- Exemplarische Bewertung

  Gemessen am Projektziel, werden die beiden Varianten wie folgt bewertet:

  - Voreinstellung vorhanden - gut
  - Voreinstellung nicht vorhanden - schlecht

- Exemplarische Gewichtung

  Die Auswirkungen einer fehlenden Voreinstellung sind nicht gravierend.

  Die Beispiel-Nutzwertanalyse wird durchgeführt mit $g_{13} = 2$ % (vgl. **Bild 42**, S. 95).

- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde

Eine Voreinstellung ist nicht vorhanden.

Projektziel 14: Bestmögliche Führung von MS_3 (Oberflächenwasser)

- Bezug zu den Grundlagen

  Im Kap. 3.1.3 sind die drei Varianten, das Oberflächenwasser zu führen, beschrieben. In Verbindung hiermit sind im Kap. 6.2 die ggf. erforderlichen Abscheider erläutert.
- Formulierung des Projektziels

  Das Oberflächenwasser soll so geführt werden, dass der Betrieb der Recyclinganlage möglichst praktikabel durchgeführt werden kann.
- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 23: Varianten bezüglich der Führung des Oberflächenwassers

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Praktikable Führung des Oberflächenwassers	Reservebecken	keine	- Reservebecken nur Unterflur oder zusätzlich technischer Aufwand
	mechanischer Klassierer	keine	- Konflikte zwischen Spezialfahrzeugen und Fahrzeugen - mechanischer Klassierer nur Unterflur möglich, dann zusätzlicher technischer Aufwand
	Vorklassierer	- Der Vorklassierer kann als Teil der Kläreinrichtung herangezogen werden.	keine

- Aussagen zur Operationalität

  Projektziel 14 lässt sich nur teilweise quantifizieren. Dass die unterschiedlichen Varianten Unterschiede in der Betriebspraktikabilität mit sich bringen, ist nachvollziehbar. In welchem Umfang dies geschieht, kann nicht angegeben werden und lässt sich auch nicht messen.
- Exemplarische Bewertung

  Gemessen am Projektziel werden die drei Varianten wie folgt bewertet:
  - Reservebecken - befriedigend
  - Mechanischer Klassierer - schlecht
  - Vorklassierer - gut
- Exemplarische Gewichtung

  Der Verfasser ist der Meinung, dass es sich hierbei um ein Randproblem handelt.

  Die Beispiel-Nutzwertanalyse wird durchgeführt mit $g_{14} = 2$ % (vgl. **Bild 42**, S. 95).
- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde

  Das Wasser auf den Flächen unter dem Mischturm und im Bereich des Vorklassierers wird in den Vorklassierer geleitet. Das Wasser im Bereich des Waschplatzes wird in den Abscheider geleitet.

Projektziel 15: Bestmögliche Führung von MS_1 (Restbeton des Fuhrparks)

- Bezug zu den Grundlagen

  Im Kap. 3.1.1 sind die Grundlagen für die Formulierung eines Projektzieles bzgl. der Beschickerhöhe des Aufgabetrichters beschrieben.

- Formulierung des Projektziels

  Die Höhe des Aufgabetrichters soll so gewählt werden, dass alle Fahrzeuge den mechanischen Klassierer möglichst ohne technischen Mehraufwand benutzen können.

- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 24: Varianten bei der Führung des Materialstromes MS_1

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Bestmögliche Höhe des Aufgabetrichters	$h_T \geq h_{min,F}$	keine	- Es können nicht alle Fahrzeuge des Fuhrparks den mechanischen Klassierer ohne zusätzlichen technischen Mehraufwand benutzen.
	$h_T < h_{min,F}$	- Es können alle Fahrzeuge des Fuhrparks den mechanischen Klassierer ohne zusätzlichen technischen Mehraufwand benutzen.	keine

- Aussagen zur Operationalität

  Projektziel 15 ist quantifizierbar. Durch einen Vergleich von h_T mit $h_{min,F}$ kann eine Aussage getroffen werden, ob alle Fahrzeuge den mechanischen Klassierer ohne technische Hilfsmittel nutzen können oder nicht.

- Exemplarische Bewertung

  Gemessen am Projektziel werden die beiden Varianten wie folgt bewertet:

  - $h_t \geq h_{min,F}$ - schlecht
  - $h_T < h_{min,F}$ - gut

- Exemplarische Gewichtung

  Die Praktikabilität der Recyclinganlage wird durch dieses Kriterium nicht sehr entscheidend beeinflusst.

  Die Beispiel-Nutzwertanalyse wird durchgeführt mit $g_{15} = 2$ % (vgl. **Bild 42**, S. 95).

- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde

  Der mechanische Klassierer ist Überflur angeordnet und wurde nicht mit einem Beschickerkübel ausgestattet. Die auf dem Gelände stationierten Betonpumpen können nicht direkt in den mechanischen Klassierer spülen. Die Innenwände der Pumpenrohre werden zunächst im Vorklassierer gereinigt. Von dort wird das feste Material über MS_9 dem Klassierer zugeführt.

Projektziel 16: Bestmögliche Führung von MS_2 (Restbeton des stationären Mischers)

- Bezug zu den Grundlagen
  Die Führung des Materialstromes 3 ist für die Praktikabilität des Betriebs relevant. Innerhalb des Kap. 3.2.2 wurden die Varianten hinsichtlich der Reinigung des Zwangsmischers besprochen.
- Formulierung des Projektziels
  Die Reinigung des Zwangsmischers der Mischanlage soll so durchgeführt werden, dass sich eine bestmögliche Betriebspraktikabilität ergibt.
- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 25: Varianten der Führung des Materialstromes MS_3

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Optimale Betriebsprak-tikabilität der Reinigung des Zwangs-mischers	Führung über fest installiertes Fördersystem (MS_{2a})	- autark	- technischer Mehraufwand
	Führung über MS_1 (MS_{2b})	- kein technischer Mehraufwand	- entsprechendes Fahrzeug erforderlich
	Führung über MS_3 (MS_{2cI}/MS_{2cII})	- kein technischer Mehraufwand	- entsprechende Gefälle-verhältnisse erforderlich

- Aussagen zur Operationalität
  Projektziel 16 ist nur zum Teil quantifizierbar. Unterschiedliche Arten, den Materialstrom zu führen, führen zwar zu Unterschieden in der Betriebspraktikabilität. Allerdings ist eine Aussage darüber, in welchem Umfang dies geschieht, nicht möglich. Die Beurteilung erfolgt subjektiv.
- Exemplarische Bewertung
  Gemessen am Projektziel werden die beiden Varianten wie folgt bewertet:
  - $MS2_a$ - schlecht
  - MS_{2b} - gut
  - MS_{2cI}/MS_{2cII} - gut
- Exemplarische Gewichtung
  Hier gilt die zu Projektziel 15 gemachte Aussage.
- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde
  Die Beschickung des mechanischen Klassierers mit Restbeton aus dem Zwangsmischer wird alternativ über MS_{2cI} oder MS_{2b} vorgenommen.

Projektziel 17: Bestmögliche Führung von MS_4 (Restbetonzuschlag)

- Bezug zu den Grundlagen
  Die Förderung des Restbetonzuschlags zu seinem Verwendungsort wurde in Kap. 3.2.1 besprochen.
- Formulierung des Projektziels
  Die Förderung des Restbetonzuschlags soll unter betriebspraktikablen Gesichtspunkten bestmöglich vorgenommen werden.

- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 26: Varianten der Führung des Materialstromes MS_{11}

Zielkriterien	Varianten	Vorteile	Nachteile
Betriebspraktikable Förderung des Restbetonzuschlags	Aufbau eines Schüttkegels	- Es ist kein zusätzliches Fahrzeug erforderlich.	- Es ist ein zusätzlicher Arbeitsschritt erforderlich.
	Befüllung eines bereitstehenden Fahrzeugs oder eines Förderbandes	- Es ist kein zusätzlicher Arbeitsschritt erforderlich.	- Es ist ein zusätzliches Fahrzeug erforderlich.

- Aussagen zur Operationalität
  Projektziel 17 ist nur zum Teil quantifiziert. Die Ausbildung von MS_{17} bei ebenerdiger Zwischenlagerung des Restbetonzuschlags weist hinsichtlich der Betriebspraktikabilität andere Merkmale auf als die Beladung eines bereitstehenden Fahrzeugs. In welchem Umfang dies geschieht und welche Quantität diese Unterschiede annehmen, kann aber nicht angegeben werden.
- Exemplarische Bewertung
  Gemessen am Projektziel werden die beiden Varianten wie folgt bewertet:
  - Schüttkegel - befriedigend
  - Schutterung - gut
- Exemplarische Gewichtung
  Hier gilt die zu Projektziel 15 gemachte Aussage.
- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde
  Unter dem Austrag des mechanischen Klassierers nimmt ein bereitstehendes Multicar den Restbetonzuschlag auf (**Bild 9**). Das Multicar wird zudem für die Reinigung des Platzgeländes benötigt.

8.2.5 Interdependenzen

Projektziel 18: Bestmögliche Anordnung von mechanischem Klassierer zum Suspendierbecken in Bezug zur Geländeoberkante

- Bezug zu den Grundlagen
  Die Ausführungen bei der Beschreibung der vorhergehenden Projektziele verdeutlichen, dass sechs Projektziele die Anordnung von mechanischem Klassierer oder Suspendierbecken in Bezug zur Geländeoberkante zum Inhalt haben. Dies sind:
  - PZ 6 Minimierung der Ablagerungen bei der Führung von MS_4
  - PZ 11 Verstetigung der Restwassertemperatur
  - PZ 12 Bestmögliche Betriebspraktikabilität des MK
  - PZ 14 Bestmögliche Führung des Oberflächenwassers
  - PZ 15 Bestmögliche Beschickerhöhe des Aufgabetrichters
  - PZ 16 Bestmögliche Betriebspraktikabilität bei der Reinigung des Zwangsmischers

Für jedes dieser sechs Projektziele wird nun die Zielbeziehung zu den anderen ermittelt. Hieraus ergeben sich 15 Vergleichsvarianten, die in **Tabelle 28** in der ersten Zeile dargestellt sind. Darüber hinaus ergeben sich neun verschiedene Möglichkeiten, den mechanischen Klassierer zum Suspendierbecken in der Ansicht anzuordnen. Für jede dieser Möglichkeiten werden die 15 Vergleichsvarianten bewertet. Hieraus erhält man in **Tabelle 28** 135 Bewertungspaare. In Analogie zu **Bild 40** ergeben sich sechs Möglichkeiten, die Beziehungspaare zu beurteilen.

Zielbeziehungen	**Bewertungspaare**		
- fallende Zielkonkurrenz	schlecht	-	schlecht
- konstante Zielkonkurrenz	schlecht	-	befriedigend
- steigende Zielkonkurrenz	schlecht	-	gut
- fallende Zielkomplementarität	befriedigend	-	befriedigend
- konstante Zielkomplementarität	befriedigend	-	gut
- steigende Zielkomplementarität	gut	-	gut

- Formulierung des Projektziels
  Die Interdependenzen sollen durch Vorgabe einer Mindestanzahl von Zielkomplementaritätsurteilen bei den Vergleichsvarianten berücksichtigt werden.
- Projektzieltabelle zur Erstellung einer Zielwertmatrix

Tabelle 27: Interdependenzen

Zielkriterien	**Varianten**	**Vorteile**	**Nachteile**
Bestmögliche Anordnung vom MK zum DB in der Ansicht	Interdependenzen berücksichtigt	- Bestmögliche Betriebspraktikabilität gewährleistet	keine
	Interdependenzen nicht berücksichtig	keine	- Bestmögliche Betriebspraktikabilität nicht gewährleistet

- Aussagen zur Operationalität
  Ob die Zielbeziehungen mit den Bewertungspaaren quantitativ übereinstimmen, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Offensichtlich ergibt sich aber eine qualitative Übereinstimmung.
- Exemplarische Bewertung
  Gemessen am Projektziel werden die beiden Varianten wie folgt bewertet:
  - In mindestens 10 Vergleichen Zielkomplementarität - gut
  - In weniger als 10 Vergleichen Zielkomplementarität - schlecht
- Exemplarische Gewichtung
  In diesem Fall ergibt sich die Gewichtung aus dem arithmetischen Mittel der Zielgewichte g_6, g_{11}, g_{14}, g_{15} und g_{16}.
  Die Beispiel-Nutzwertanalyse wird durchgeführt mit g_{18} = 2,25% (vgl. **Bild 42**, S. 95).
- Bezug zur Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde
  In den 15 Vergleichen wird Zielkomplementarität erreicht.

Tabelle 28: Ermittlung der Zielbeziehungen bei Projektzielen, die sich auf die Anordnung des mechanischen Klassierers zum Dispergierbecken in der Ansicht beziehen

8.3 Bestimmung der Zielwertmatrix inklusive Zielgewichtung und Wertsynthese

Auf der Basis der exemplarischen Bewertungen und Gewichtungen sowie den Projektzieltabellen wurde eine beispielhafte Wertsynthese durchgeführt.

Die Zielgewichte g_i für die Projektziele sind bereits im vorhergehenden Kapitel exemplarisch geschätzt worden. Anhand der Zielsystemstruktur ist die Herleitung der Zielgewichte g_i in **Bild 42** dargestellt. Auf eine sukzessive Korrektur der Zielgewichte g_i (vgl. S. 70) wird an dieser Stelle verzichtet, da die Gewichtung nur beispielhaften Charakter hat. Die Wertsynthese wird mit Hilfe der Rangordnungssummenregel (S. 71) vorgenommen. Unter der Voraussetzung, dass die Nutzendistanzen zwischen den benachbarten Rängen gleich groß sind, werden hierbei die Zielgewichte g_i mit den im vorhergehenden Kapitel ermittelten Rängen g_i multipliziert. Durch Addition der Produkte erhöht man den Nutzwert. In dem Fall der bewerteten Restbetonrecyclinganlage Ludwigsfelde beträgt der Nutzwert N_{MRBR} = 1,3350. Der bestmögliche Nutzwert beträgt rechnerisch N_{BEST} = 1 und der schlechtmöglichste Nutzwert beträgt N_{WORST} = 3. Legt man bei der Bewertung z. B. ein lineares Abbildungsschema nach dem Punktesystem bei Abiturnoten zugrunde, wie in **Tabelle 11** dargestellt, ergeben sich für die bewertete Anlage 12-13 Punkte.

Tabelle 29: Nutzwertbewertung nach Abiturpunktesystem

Nutzwert	1,00	1,14	1,28	1,43	1,57	1,71	1,86	2,00	2,14	2,28	2,43	2,57	2,71	2,86	3,00
Punkte	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

In der Praxis würde man entweder vorhandene Anlagen nach diesem Schema bewerten (wie hier geschehen), um Schwachpunkte und vor allem auch deren Ausprägung herauszufiltern, so dass Optimierungspotentiale aufgezeigt werden können. Oder man bewertet bei Neuinvestitionen die Angebote mehrerer Hersteller, um neben den Herstellungskosten für die Anlage noch eine weitere quantifizierte Entscheidungshilfe zu haben.

Bild 42: Nutzwertanalyse am Beispiel der Recyclinganlage in Ludwigsfelde

PZ 1	PZ 2	PZ 3	PZ 4	PZ 5	PZ 6	PZ 7	PZ 8	PZ 9	PZ 10	PZ 11	PZ 12	PZ 13	PZ 14	PZ 15	PZ 16	PZ 17	PZ 18
Optimale Wieder-verwendung des RBZ	Optimale Art der Dichte-messung	Optimaler Suspendier-zustand	Optimale Ausführung im Grundriss	Optimale Ausführung in der Ansicht	Minimierung der Ablage-rungen bei der Führung von MS6	Minimierung der Ablage-rungen bei der Führung von MS5	Optimale Auswasch-leistung	Optimales Trenn-verhalten	Optimale Suspendier-raum-grösse	Optimale Verstetigung der Restwasser-temperatur	Optimale Anordnung in Bezug zur Gelände-oberkante	Automati-sierung der Spül-wasser-zugabe	Bestmögliche Führung von MS3	Bestmögliche Führung von MS1	Bestmögliche Führung von MS2	Bestmögliche Führung von MS 4	Bestmögliche Anordnung von MK zu SB in Bezug zur Gelände-oberkante
100 %																	
40 %	60 %																
40 %	15 %						27 %			15,75 %							2,25 %
12 %	28 %	10 %			2,5 %	2,5 %	18 %		9,0 %	1,75 %	2,0 %	10,0 %					2,25 %
g_1 = 12 %	g_2 = 28 %	g_3 = 5,0 %	g_4 = 2,5 %	g_5 =2,5 %	g_6 = 2,5 %	g_7 = 2,5 %	g_8 = 9,0 %	g_9 = 9,0%	g_{10} = 9,0 %	g_{11} = 3,75 %	g_{12} = 2,0 %	g_{13} = 2,0 %	g_{14} = 2,0 %	g_{15} = 2,0 %	g_{16} = 2,0 %	g_{17} = 2,0 %	g_{18} = 2,25 %
Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1	Rang 1
Weitere Klassierung	Automatisch	Vollständige Suspension erreicht	rund ohne Stromstörer	Kugel-boden	Positives starkes Gefälle	SB nahe MA mit TP	$\dot{V}_{ist}=\dot{V}_{soll}$	EDS_{krit} wurde ermittelt	Berechnung durchgeführt	unterflur	überflur	Voreinstellung vorhanden	Vorklassierer	$h_t<h_{min,F}$	MS_{2cl} MS_{2cl} MS_{2b}	Befüllung	≥10 Vergleiche Zielkomple-mentarität
Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2	Rang 2
Getrenntes Lagern und Dosieren	Händisch mit Pyknometer	Vollständige Suspension erreicht ohne Überprüfung d.Rührleistung	rechteckig	Klöpper-boden	Positives flaches Gefälle	SB nahe MA mit SP und SB fern MA mit TP	$\dot{V}_{ist}>\dot{V}_{soll}$	(-)	(-)	teilversenkt	teilversenkt	(-)	Reserve-becken	(-)	(-)	(-)	(-)
Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3	Rang 3
Volume-trisches Abschätzen	Händisch mit Aräometer	vollständiges Suspension nicht erreicht	rund mit Stromstörer	Flach-boden	Negatives Gefälle	SB fern MA mit SP	$\dot{V}_{ist}<\dot{V}_{soll}$	EDS_{krit} wurde nicht ermittelt	Berechnung nicht durchgeführt	überflur	unterflur	Voreinstellung nicht vorhanden	Mechanischer Klassierer	$h_t\geq h_{min,F}$	MS_{2a}	Schüttkegel	< 10 Vergleiche Zielkomple-mentarität
			w	e	r	t	s	y	n	t	h	e	s	e			
0,2400	0,2800	0,1000	0,0250	0,0750	0,0500	0,0250	0,1800	0,0900	0,0900	0,0375	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0225

Nutzwert:	1,3350
bestmöglicher Nutzwert:	1,0000
schlechtest-möglicher Nutzwert:	3,0000

8.4 Anwendung der Bewertungsmethode auf vorhandene Recyclinganlagen

Zur Verifizierung der Ergebnisse dieser Arbeit wurden neben der bereits beschriebenen Recyclinganlage in Ludwigsfelde drei weitere Recyclinganlagen mit der neu entwickelten Bewertungsmethode untersucht (Anlage 1). **Tabelle 30** gibt einen Überblick über die Ergebnisse der bewerteten Anlagen.

Tabelle 30: Vergleich der Nutzwerte der bewerteten Restbetonrecyclinganlagen

	Ludwigsfelde	**Rudolstadt**	**Dortmund**	**Leipzig**
Baujahr	1994	1992	1988	1994
PZ 1	0,2400	0,1200	0,3600	0,2400
PZ 2	0,2800	0,5600	0,8400	0,8400
PZ 3	0,1000	0,1000	0,1000	0,100
PZ 4	0,0250	0,0250	0,0500	0,0500
PZ 5	0,0750	0,0750	0,0750	0,0750
PZ 6	0,0500	0,0500	0,0500	0,0750
PZ 7	0,0250	0,0500	0,0250	0,0500
PZ 8	0,1800	0,0900	0,1800	0,2700
PZ 9	0,0900	0,2700	0,2700	0,2700
PZ 10	0,0900	0,2700	0,2700	0,2700
PZ 11	0,0375	0,0375	0,0375	0,1125
PZ 12	0,0200	0,0400	0,0200	0,0200
PZ 13	0,0200	0,0600	0,0200	0,0600
PZ 14	0,0200	0,0200	0,0200	0,0600
PZ 15	0,0200	0,0200	0,0200	0,0600
PZ 16	0,0200	0,0200	0,0200	0,0600
PZ 17	0,0200	0,0600	0,0600	0,0600
PZ 18	0,0225	0,0225	0,0225	0,0225
Nutzwert	**1,3350**	**1,8900**	**2,4400**	**2,6950**
Punkte	**13**	**9**	**5**	**3**

Es ist eine große Bandbreite der Nutzwerte erkennbar. Der arithmetisch mögliche Nutzwertbereich vom bestmöglichen Nutzwert 1 bis zum schlechtestmöglichen Nutzwert 3 konnte durch die Beispiele ausgenutzt werden. Die größten Nutzwertbeeinflussungen werden durch die Projektziele mit den größten Zielgewichten erreicht. Es wird aber deutlich, dass die Summe der Projektziele mit geringem Zielgewicht den Nutzwert ebenfalls maßgeblich beeinflussen. Als Beleg für bisher fehlende Entscheidungshilfen konnte festgestellt werden, dass keineswegs jüngere Anlagen besser abschneiden als ältere.

Den besten Nutzwert erhält die Anlage in Ludwigsfelde. Den zweitbesten Nutzwert erhält die Anlage in Rudolstadt. Im wesentlichen schneidet Rudolstadt wegen fehlender Berechnungen bei PZ 9 (Optimales Trennverhalten) und PZ 10 (Optimale Suspendierraumgröße) schlechter als Ludwigsfelde ab. Den drittbesten Nutzwert erhält die Anlage in Dortmund. Das schlechtere Abschneiden dieser Anlage gegenüber der Anlage in Rudolstadt ist maßgeblich auf das Umgehen mit den Recyclingprodukten PZ 1 (Optimale Wiederverwertung des RBZ) und PZ 2 (Optimale Art der

Dichtemessung) zurückzuführen. Den schlechtesten Nutzwert erhält die Anlage in Leipzig, weil hier in der überwiegenden Zahl der Projektziele der schlechteste Rang belegt wird.

Zur Optimierung kann nun projektzielweise geprüft werden, ob eine Nutzwertverbesserung im Verhältnis zum Aufwand steht. Bei einigen Projektzielen kann der Nutzwert durch relativ einfache Maßnahmen verbessert werden.

- PZ 5 : Da es sich um eine Anlage mit Hochbecken handelt, kann die Bodenform leicht verändert werden. Der Nutzwert lässt sich hierdurch um 0,05 senken.
- PZ 8 : Wie im Rahmen der Arbeit gezeigt wurde, lässt sich die Auswaschleistung für Restbeton bereits durch einen zweiten Wassergalgen beträchtlich erhöhen. Hierdurch sinkt der Nutzwert um 0,09.
- PZ 10 : Durch eine nachträgliche Berechnung der Suspendierraumgröße und das eventuelle Aufstellen eines weiteren Hochbeckens lässt sich der Nutzwert um 0,18 senken.
- PZ 13 : Eine automatische Spülwasserzugabe ist nachrüstbar und verbessert den Nutzwert um 0,04.

Durch die beschriebenen vier Maßnahmen würde sich der Nutzwert von 2,695 auf 2,055 verbessern und damit bereits sehr nah am Nutzwert der zweitbesten Anlage liegen.

9. Zusammenfassung

Zur Einhaltung umweltgesetzlicher Vorschriften, zur Schonung von Deponieraum sowie zur Einsparung von Gesteinskörnung und Frischwasser werden heute bei der überwiegenden Anzahl der Transportbetonwerke Restbetonrecyclinganlagen eingesetzt. Pro Jahr können durch Restbetonrecycling 3,6 Mio. t Zuschlagstoffe eingespart werden. Es herrscht ein breiter Konsens, dass eine umweltgerechte Produktion von Frischbeton ohne den Einsatz von Restbetonrecyclinganlagen nicht mehr denkbar ist.

Trotz der weiten Verbreitung erfolgt die Planung der Restbetonrecyclinganlagen immer noch durch learning-by-doing, da verfahrenstechnisches Grundlagenwissen nicht vorliegt. Wer an verantwortlicher Stelle die Investition in eine neue oder in die Verbesserung einer bestehenden Restbetonrecyclinganlage beurteilen soll, steht vor einer komplexen Entscheidung, die unter Berücksichtigung unterschiedlichster Kriterien getroffen werden muss. In der Praxis besteht hinsichtlich der Qualitätssicherung der Recyclingprodukte, der Ablagerungen der noch reaktiven Zementpartikel, der Bemessung der eingesetzten Maschinen, der praktikablen Handhabung hinsichtlich einiger Detailprobleme sowie der Anordnung der verfahrenstechnischen Komponenten in Bezug zur Geländeoberkante weitgehend Unklarheit. Das allgemeine Verlangen nach einer durchdachten Entscheidungshilfe und die Notwendigkeit, zu einem sachlich begründeten Urteil zu kommen, macht Entscheidungshilfen für die Planung von Restbetonrecyclinganlagen erforderlich. Insbesondere da Fehlentscheidungen nicht oder nur mit großem Aufwand rückgängig gemacht werden können.

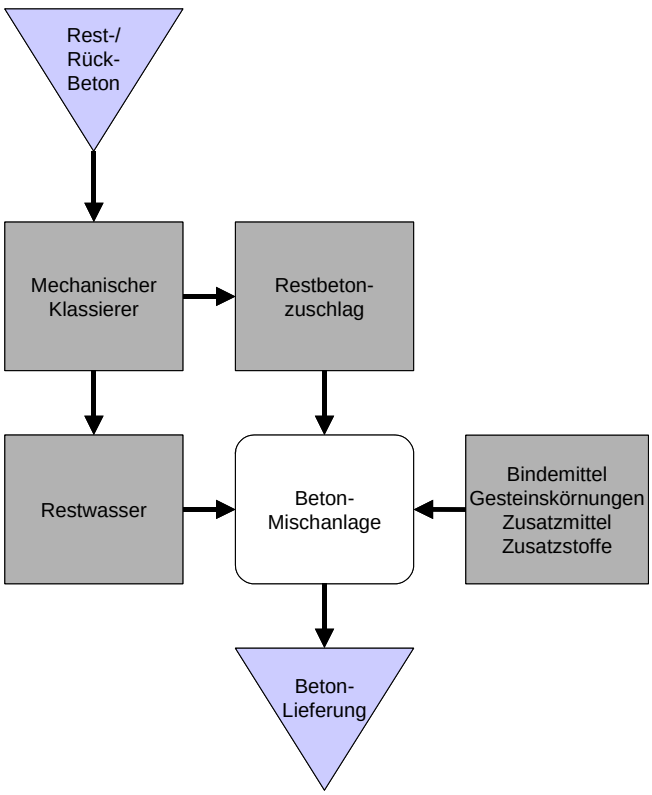


Bild 43: Recycling von Betonrestmassen

Im ersten Teil der Arbeit wurden die Grundlagen der Recyclingtechnik erläutert. Für das Trennen des Restbetons in Restwasser und Restbetonzuschlag werden in erster Linie mechanische Klassierer mit

Auswaschschnecke verwendet (**Bild 43**). Es kommen aber auch Trommelsysteme, Trogsysteme und Kombinationen aus Auswaschschnecke und Trommel- oder Trogsystemen zum Einsatz. Aufgrund der hohen Einsatzhäufigkeit sind im Rahmen dieser Arbeit Auswaschschnecken untersucht worden. Als weitere verfahrenstechnisch wichtige Komponente von Restbetonrecyclinganlagen muss das Suspendierbecken angesehen werden. In ihm wird das Restwasser mit Rührwerken suspendiert, um Ablagerungen von Feststoffen zu vermeiden. Aus dem Suspendierbecken wird das Restwasser entnommen, um in der Mischanlage neuen Beton herzustellen.

Als weitere Grundlage können die Eigenschaften der Recyclingprodukte und die Führung der Materialströme durch eine empirische Analyse mit Hilfe von Literaturrecherchen, Besichtigungen und dem Studium von betrieblichen Lenkungsprozessen und Qualitätssicherungssystemen beschrieben werden. Das Klassieren des Restbetons kann durch neue Versuchsergebnisse hinsichtlich des Trennverhaltens des mechanischen Klassierers dargelegt werden. Die Restwassersuspendierung ist durch eine neue Modellrechnung beschreibbar.

Im zweiten Teil wurden die Grundlagen für ein allgemeingültiges Ablaufschema zur Entscheidungsfindung besprochen. Das Ablaufschema musste der Anforderung gerecht werden, nicht nur die sehr facettenreichen, objektiven Aspekte der Grundlagen der Restbetonrecyclingtechnik zu berücksichtigen. Es mussten auch subjektive Einschätzungen verarbeitet werden können. Hierfür stellt die Systemwissenschaft mit der Nutzwertanalyse eine im Zusammenhang mit Restbetonrecycling neue Methode bereit, die sich wegen der Möglichkeit der Berücksichtigung multidimensionaler Zielsetzungen für die vorliegende Entscheidungssituation besonders gut eignet. Ausgehend von einem zunächst ungeordneten Zielkatalog, wird durch die Gliederung und Ordnung der Ziele ein Zielsystem entwickelt. Die widerspruchsfreie Strukturierung der Ziele in einem Zielsystem ist die zentrale Voraussetzung für eine rationale Entscheidung bei Problemen mit mehrfacher Zielsetzung. Auftretende Interdependenzen zwischen Einzelzielen, wie zum Beispiel Zielkonkurrenz, müssen bei der Bewertung getrennt beurteilt werden. Die Bewertung der Einzelziele erfolgt auf einer der drei grundsätzlich möglichen Skalen. Für das Restbetonrecycling ist eine Unterart der Kardinalskalen anwendbar. Die Verhältnisskalierung mit Hilfe der Methode der sukzessiven Vergleiche berücksichtigt Nutzenunterschiede durch die Ermittlung von nutzenabhängigen Kriteriengewichten.

Im dritten Teil wird die Nutzwertanalyse mit den ermittelten verfahrenstechnischen Grundlagen verknüpft. Hierbei werden quantifizierbare mit nicht quantifizierbaren Projektzielen in einem Ablaufschema vereint. Hierfür wurden 18 maßgebende Entscheidungskriterien entwickelt. Diese Entscheidungskriterien wurden im Rahmen der Nutzwertanalyse als Projektziele entwickelt. Die erarbeiteten Kriterien lassen sich in fünf Kategorien einteilen:

- Kriterien zur Qualitätssicherung bei der Verwendung der Recyclingprodukte
  Für die Wiederverwendung der Recyclingprodukte Restwasser und Restbetonzuschlag sind im technischen Regelwerk Verfahrensweisen vorgeschrieben. Hinsichtlich der Prozesse bei der Wiederverwendung konnten deutliche Verbesserungspotentiale aufgezeigt werden. Besonders die Anwendung von online-Dichtemessverfahren im Vergleich zur Aräometermessung verbessert die Lenkungsprozesse zur Qualitätssicherung. Aber auch die weitere Klassierung oder das getrennte Lagern und Dosieren des Restbetonzuschlags im Vergleich zu der im technischen Regelwerk vorgeschriebenen Verfahrensweise des volumetrischen Abschätzens birgt Verbesserungspotential.

- Kriterien zur Minimierung von Ablagerungen

  Noch reaktive Zementpartikel kommen zeitweise permanent mit Anlagenkomponenten, Leitungen und Beckeninnenflächen der Recyclinganlage in Berührung. Ablagerungen von Zementpartikeln, die den Betrieb der Anlage behindern, verschlechtern oder sogar verhindern, sind unvermeidbar. Allerdings kann, wie im Rahmen dieser Arbeit gezeigt wurde, eine Minimierung der Ablagerungen durch geeignete Maßnahmen herbeigeführt werden. Die Ablagerungen im Suspensionsbecken lassen sich durch den Zustand der homogenen Suspension sowie durch an das Strömungsbild angepasste Formgebung minimieren. Durch die geeignete Gefällewahl und vor allem durch die korrekte Wahl der Pumpenart können die Ablagerungen in Leitungen minimiert werden.

- Kriterien zur Bemessung der verfahrenstechnischen Apparate

  Die Auslegung der Recyclinganlage hinsichtlich der Auswaschleistung, der Rührerleistung und der Größe des Suspendierraumes erfolgt bisher anhand von praktischen Erfahrungswerten. In dieser Arbeit wurde für die Auswaschleistung ein allgemeingültiges Berechnungsmodell hergeleitet. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass die Rührerleistung für das Suspendieren von Restwasser berechnet werden kann. Die Größe des Suspendierraumes kann unter Berücksichtigung der zu- und abfließenden Materialströme ebenfalls berechnet werden.

  Das Trennverhalten des mechanischen Klassierers wurde im Rahmen einer Versuchsreihe mit folgenden Ergebnissen ermittelt:

  - Die Klassierdurchsätze steigen mit größer werdendem Entleerdurchsatz. Aufgrund der Pufferwirkung des mechanischen Klassierers, bei der die diskontinuierlich in den Aufgabetrichter gefüllte Restbetontrübe (Entleeren) in einem kontinuierlichen Prozess (Klassieren) durch den Trog gefördert wird, nähert sich der Klassierdurchsatz asymptotisch einem Grenzwert an.
  - Das Masseausbringen rbz wird signifikant vom Klassierdurchsatz und weniger vom Entleerdurchsatz beeinflusst.
  - Die Korngrößenverteilungen des Restbetons, des Restbetonzuschlags und des Restwassers belegen anschaulich den ereichten Trenneffekt.
  - Die Trennkorngröße steigt mit zunehmendem Klassierdurchsatz an. Diese Tendenz ist allerdings nur bei Betrachtung des „nassen“ Klassierdurchsatzes signifikant erkennbar. Bei Betrachtung des „trockenen“ Durchsatzes ergibt sich keine Abhängigkeit. Die Ursache hierfür ist, dass in den „nassen“ Durchsatz Prozesse wie Trübeagitation und Feinkornkonzentration indirekt eingehen.
  - Der Fehlkornanteil < 125 µm im Restbetonzuschlag steigt ebenfalls mit „nassem“ Klassierdurchsatz an.
  - Im Unterschied dazu bestehen für den Fehlkornanteil > 125 µm im Restwasser signifikante Abhängigkeiten zu Entleer- und Klassierdurchsätzen. Ursache ist der tote Fluss.

- Kriterien zur Praktikabilität des Anlagenbetriebes

  Einige Detaillösungen führen derzeit in der Praxis nicht zu optimalen Ergebnissen. Auf Grundlage der empirischen Untersuchung in dieser Arbeit konnten die maßgebenden Entscheidungskriterien aufgezeigt und somit ein allgemeingültiges Ablaufschema zur Entscheidungshilfe für die Praktikabilität erstellt werden. Damit wurde diese Teilproblematik in allen relevanten Kriterien transparent und einer sachlichen Diskussion zugänglich gemacht. Die Nutzwertanalyse ist die

geeignete Methode, die nachfolgenden Parameter miteinander zu verknüpfen und die bestmögliche Variante für den speziellen Einzelfall zu ermitteln:

- Verstetigung der Restwassertemperatur
- Anordnung des mechanischen Klassierers in Bezug zur Geländeoberkante
- Spülwasserzugabe
- Führung der Materialströme MS_1 (Restbeton des Fuhrparks), MS_2 (Restbeton des stationären Mischers), MS_3 (Oberflächenwasser) und MS_4 (Restbetonzuschlag).

- Interdependenzen zwischen Anlagenkomponenten
  Die Anordnung des mechanischen Klassierers einerseits und des Suspendierbeckens andererseits in Bezug zur Geländeoberkante steht mit sieben Projektzielen in Beziehung. Bei der Analyse dieser Zielbeziehungen konnten in dieser Arbeit Interdependenzen festgestellt werden. Diese sind in einem eigenständigen Projektziel verarbeitet worden, um die bestmögliche Entscheidung für jeden Einzelfall ermitteln zu können.

Ohne die entwickelten Entscheidungshilfen und vor die Aufgabe gestellt, eine Recyclinganlage für Restbeton zu bauen, hat die Entscheidungsperson bisher zunächst verschiedene Angebote von Herstellern eingeholt und verglichen. Auf einen dieser Hersteller fiel die Wahl. Mit den Entscheidungshilfen kann die Entscheidungsperson die konzeptionelle Federführung bei der Planung der Anlage übernehmen. Gerade für den Anwendungsfall des Angebotsvergleiches eignet sich die in dieser Arbeit vorgestellte Methode der Nutzwertanalyse.

Die Auswertung zeigt, dass die Anwendung der Nutzwertanalyse nicht zu einer Optimallösung im mathematischen Sinn führt und der Lösungsweg auf entscheidungstheoretischen Annahmen basiert, die nur bedingt überprüft werden können. Trotzdem bietet die Nutzwertanalyse ein allgemeingültiges Ablaufschema sowohl für quantifizierbare als auch für nicht quantifizierbare Kriterien des Restbetonrecyclings innerhalb einer Entscheidungsanalyse. Sachwissen und wissenschaftliche Methode werden innerhalb der Nutzwertanalyse durch die präferenzgerechte Formulierung von Zielgewichten und Zielwerten miteinander verknüpft. Darüber hinaus werden sachlich begründete Wertungen in allen Auswirkungen sichtbar gemacht und zu einer befriedigenden Gesamtaussage zusammengefasst. Dies wird insbesondere bei den im Anhang 1 dargelegten Praxisbeispielen deutlich. Hierbei wurden drei bestehende Anlagen mit dem in dieser Arbeit entwickelten Schema bewertet. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Anlagen optimieren und die Nutzwerte durch einfache Maßnahmen deutlich verbessern lassen.

Zum Ausblick ist zu sagen, dass das Ergänzen der Nutzwertanalyse um ökonomische Ziele empfehlenswert ist. Hierbei muss zwischen Betriebskosten und den Investitionskosten unterschieden werden. Neben den beschriebenen 18 Projektzielen ist die Berücksichtigung der Anschaffungskosten als 19. Ziel bereits heute sehr leicht möglich. Hinsichtlich der Betriebskosten kann man in 1. Näherung unterstellen, dass die technisch beste Lösung mit der betriebswirtschaftlich sinnvollsten Lösung kommuniziert. Ein Beispiel mag dies an dieser Stelle illustrieren: maschinen- wie bautechnisch erwies sich die Auslegung als optimal, die Ablagerungen von Feinstoffen weitgehend verhindert. Dieses Kriterium ist schon deshalb auch ökonomisch von Relevanz, weil aufwendige Reinigungsarbeiten und die daraus resultierenden Stillstandszeiten minimiert worden sind. Einige der hier im maschinen- oder bautechnischen Sinne als „nicht zu quantifizieren“ bezeichneten Kriterien sind bei Einbeziehung von

ökonomischen Kenndaten leicht bzw. leichter zu quantifizieren. Dadurch würde zwar die Komplexität der Nutzwertanalyse erhöht, die Ergebnisse allerdings weiter präzisiert. Eine wissenschaftliche Unterlegung dieser vermuteten Zusammenhänge und eine Erweiterung der Nutzwertanalyse um Energieverbrauchsminimierungsziele, Reparaturkostenminimierungsziele, Wartungsaufwandminimierungsziele sowie die Berücksichtigung von Finanzierungs- und Fiskalischen Zielstellungen ist sinnvoll, hätte aber den Rahmen der Arbeit gesprengt.

Darüber hinaus ist eine genauere Betrachtung der Art der Anrechnung der Feinstoffe im Restwasser in der Stoffraumrechnung für Betonmischungen sinnvoll. Bezüglich der Verarbeitbarkeit des Restbetonzuschlags sollte bei der Ermittlung des kritischen Emtleerdurchsatzes die Zementart und –güte sowie eine eventuelle Temperatur- und Zeitabhängigkeit der Kornbindungserscheinung Berücksichtigung finden. Hinsichtlich der praktischen Durchführung der Nutzwertanalyse ist eine weitere Schematisierung hilfreich. Durch den Ausblick wird deutlich, dass durch die Ergebnisse dieser Arbeit neue Fragestellungen entstanden sind, die der Beantwortung bedürfen.

10. Literatur- und Schrifttumsverzeichnis

[1]	Albach, H.	Investitionstheorie. Köln,:Kiepenheuer & Witsch, 1975
[2]	Bamberg, Günter; Coenenberg, Gerhard	Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre.-4., überarb. Aufl.- München: Vahlen, 1985
[3]	Bauforschungsbericht	Bau- und Wohnforschung, Recyclinggerechter Baustellenbetrieb (F 2152). Bearbeitet im Auftrag des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn. - Stuttgart: IRB Verlag, 1990
[4]	Baumann, Kurt	Die Anwendung nutzwertanalytischer Methoden in der Praxis: St. Gallen, Hochschule, Diss., 1979
[5]	Bisle, Hans	Ausbessern von Betonoberflächen: Rezepte und Arbeitsverfahren / Hans Bisle. - 2., durchges. u. erw. Auflage - Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 1978
[6]	Bitz, Michael	Entscheidungstheorie. München: Vahlen, 1981
[7]	Bonzel, Justus; Dahms, Jürgen	Über den Wasseranspruch des Frischbetons; beton 9/78, S. 331-336
[8]	Bonzel, Justus; Dahms, Jürgen	Über den Wasseranspruch des Frischbetons,- Fortsetzung aus Heft 9/1978-; beton 10/1978, S. 362-367
[9]	Bonzel, Justus; Dahms, Jürgen	Über den Wasseranspruch des Frischbetons,- Fortsetzung aus Heft 10/1978-; beton 11/1978, S.413-416
[10]	Breitenbucher, R	Recycling von Frisch- und Festbeton. beton 9/1994, S. 510-514
[11]	Bunke, Norbert	Erläuterungen zur Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restbeton, Restmörtel und Restwasser (Restwasser-Richtlinie). Berlin: Ernst & Sohn, Beton- und Stahlbetonbau 87, Heft 10, 1992, S. 254-257
[12]	Colenbrander, W.; Huysmans, M. A. J.; Souwerbren, C	Hergebruik van cementslib als vulstof in beton,-Wiederbenutzung von Zementschlamm als Füllstoff im Beton -; Cement , Heft 8, 1977, S. 357-361
[13]	Czernin, Wolfgang	Zementchemie für Bauingenieure. - 3., neubearb. Aufl. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 1977
[14]	Dahlhoff,U.; Budnik.J.; Scholl,E.	Frischbetonrecycling im Transportbetonwerk. In: Beton 45 (1995), Nr. 11, S. 792-796
[15]	Drees, G.; Hensler, F.	Instandhaltung von Baumaschinen. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 1982.
[16]	Drees, Gerhard	Recycling von Baustoffen im Hochbau: Geräte, Materialgewinnung, Wirtschaftlichkeitsberechnung / Gerhard Drees. - Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 1989
[17]	Drinkgern, Gerd	Schädliche Bestandteile und ihre Wirkung auf Baustoffe; Aufbereitungs-Technik, Heft 5, 1989, S. 301-305
[18]	Drinkgern, Gerd	Wasseranspruch sandreicher Betone,- Einflluß der Sieblinie des Sandes auf die Konsistenz-; beton 9/1989, S. 381-383
[19]	Drinkgern, Gerd	Über den Trennschnitt 0,06mm bei der Feinsandrückgewinnung; Aufbereitungs-Technik 4/1992, S. 226-227
[20]	Ebeling, Karsten; Klose, Norbert	Beton: Herstellung nach Europäischer Norm. Hrsg. von der Bauberatung Zement; Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. - Düsseldorf: Beton-Verlag, 1992
[21]	Einenkel, Wolf Dieter	Beschreibung der fluiddynamischen Vorgänge beim Suspendieren im Rührwerk. München 1979, Diss.
[22]	Endress + Hauser Holding AG	Abwasser: Meß- und Regeltechnik. Dornach: J. Plüss AG, 1992 (1. Ausgabe)
[23]	Frenking, Hubert	Mikroprozessor-Steuerungen in Transportbetonanlagen,- Stand der Technik und Zukunft -; beton, Heft 9, 1989, S. 384-387
[24]	Frenking, Hubert	Mikroprozessor-Steuerungen in Transportbetonanlgen: Grundlagen, Auswahlhilfen / Hubert Frenking. Durchgeführt im Auftr. d. Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. (FTB). - Düsseldorf: Beton-Verlag, 1987, (Schriftenreihe des Bundesverbandes der DeutschenTransportbetonindurstrie e. V. Duisburg; H. 2)
[25]	Friesenborg, B.	Restbetonrecycling,- Statusseminar "Bauforschung und - technik" des BMFT-; Bauwirtschaft, Heft 42, 21. Oktober 1982, S. 1590-1592
[26]	Friesenborg, Bernd; Genenger, Rolf; Orlowski, Franz	Restbetonrecycling,- Recycling of waste concrete-, Betonwerk+Fertigteiltechnik, Heft 12, 1984, S. 830-836
[27]	Fritschi, Anton	Praktisches Konzept zur wirtschaftlichen Beurteilung von Investitionen: Zürich, Eidgenössischen Technischen Hochschule, Diss., 1972
[28]	Gabbert, Dagmar	Rückgewinnung von Zuschlagstoffen aus Restbeton; Bauplanung-Bautechnik, Heft 10, Oktober 1981, S. 469-470

[29]	Geisler, Reinhard Kurt	Fluiddynamischer Leistungseintrag in turbulent gerührten Suspensionen: München, Technische Universität München, Diss., 1991
[30]	Hanssmann, Friederich	Einführung in die Systemforschung: Methodik d. modellgestützten Entscheidungsvorbereitung.- 3., völlig überarb. Aufl. -München; Wien: Oldenbourg, 1987
[31]	Harr, K.; Tax, M.	Einfluß von Betonrestwasser auf die zement- und betontechnologischen Eigenschaften. Weimar:Hochschule für Architektur und Bauwesen, Universität, 1994.-In: 12.Internationale Baustofftagung-ibausil-,22.-24.09.1994 in Weimar Tagungsbericht Band 2, S. 429-437
[32]	Hartramph, Artur	Die Progressionsfunktion und deren Bedeutung bei der Optimierung nichtlinearer Kostenfunktionen verfahrenstechnischer Anlagen und Apparate: Stuttgart, Universität, Diss., 1971
[33]	Hauptverband der Deutschen Bauindustrie; BGL	Baugeräteliste 2001: BGL; technisch-wirtschaftliche Baumaschinendaten / hrsg. vom Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V. unter Mitw. zahlr. Fachleute der Bauindustrie. - Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 2001
[34]	Hayessen, Wolfgang	Nutzungsdauer und Abschreibungsverlauf von Baumaschinen: München, Technische Hochschule, Diss., 1963
[35]	Hornung, Fridolin	Recycling of residual concrete in ready-mixed concrete plants. TB-Kongress in Madrid 6.92.
[36]	Johnson, Kenneth L.	Operation Research. Düsseldorf: VDI-Verl., 1973
[37]	Jurecka, W.	Kosten und Leistungen von Baumaschinen. Wien/New York: Springer, 1975.
[38]	Kantorowitsch, S. B.	Chemiemaschinen. Berlin: VEB Verlag Technik Berlin, 1970
[39]	Kemper, Dirk	Die Betriebswirtschaftliche Anwendung der Cost-Efficiency-Analysis als Verfahren zur Berücksichtigung von Imponderabilien im Investitionskalkül: Göttingen, Georg-August-Universität, Diss., 1980.
[40]	Kern, Edgar	Anwendung von Betonzusatzmitteln,- Arten, Eigenschaften und Einsatzgebiete -; beton, Heft 9, 1987, S. 359-362
[41]	Klärfix-Wasseraufbereitungstechnik	Restbeton muß nicht mehr auf die Deponie, Klärfix-Recyclingsystem; BMT 4, April 1986, S. 212
[42]	Krahl, Götz	Abwasser im Transportbetonwerk; Das Baugewerbe, Heft 16, 1974, S. 18-23
[43]	Kruschwitz, Lutz	Investitionsrechnung- 3., bearb. Aufl.- Berlin/New York, de Gruyter, 1987.
[44]	Kunz, Peter; Müller, Annette; Böhm, Eberhard; Herz, Hermann	Ansatzpunkte zur dezentralen Steuerung kleiner und mittelgroßer Kläranlagen. - Möglichkeiten der Energieeinsparung-. Forschungsbericht T 85-114, Karlsruhe, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, 1985 (München: Engelhard, 1985)
[45]	Lewandowski, R.; Peterfy, P.	Einfluß von Schlammzugaben auf die Betoneigenschaften. Bauwirtschaft, Heft 27, 15. Juli 1976, S. 1384-1393
[46]	Lewandowski, R.; Peterfy, P.	Beeinflussung der Betoneigenschaften durch Zusatz von mineralischen Schlämmen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 10, 1976, S. 503-505
[47]	Lewandowski, R.; Peterfy, P.	Beeinflussung der Betoneigenschaften durch Zusatz von mineralischen Schlämmen, Teil 2; Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 11, 1976, S. 562-566
[48]	Liepe, Friedrich; Koschk, Roland	Untersuchungen zum Stoffvereinigen in flüssiger Phase Teil 8: Die Aufstellung eines strömungsmechanisch begründeten Suspendiermodells
[49]	Lippek, E.; Espig, D.	Forschungsarbeiten zur mathematischen Modellierung von Trockenmahlanlagen, Freiberger Forschungsheft A 602 (1978), S. 77-87
[50]	Lisiecki, Karl-Heinz	Wirksamkeitsfaktor und Zementäquivalentmasse - neue Kenngrößen zur Bewertung von Betonzusatz- und Zementzumahlstoffen. betontechnik, Heft 2, April 1987, S. 58-62
[51]	Mag, Wolfgang	Grundzüge der Entscheidungstheorie. München: Vahle, 1990
[52]	Manns, Wilhelm	Betontechnologische Überlegungen zur Ausnutzbarkeit natürlicher Zuschlagvorkommen; beton (1982) 11, S. 427-430 und (1982) 12, S. 461-463
[53]	Mars, J. O.; Valle, S. A.; Clark, H. A.	Recent developmentsin waste concrete and wash water recovery systems. TB-Kongress in Madrid 6.92
[54]	Martz, Georg	Siedlungswasserbau. Düsseldorf: Werner, 1987
[55]	Matos, Adriano	Recycling of wastes. TB-Kongress in Madrid 6.92
[56]	Meinert, Hubertus	Herstellung von qualitätsgerechtem Beton aus Zuschlagstoffen minderer Qualität; Bauplanung - Bautechnik, 36. Jg. 1982,5, S. 198-199
[57]	Meyer, Adolf	Betonzusätze, - Entwicklungen und Tendenzen -; beton, Heft 9, 1983, S. 321-324

[58]	Meyer, Hans Gerd	Übersicht über den Stand der Europäischen Normung auf dem Gebiet der Betontechnik. Berlin: Ernst & Sohn, Beton- und Stahlbetonbau 85, Heft 12, 1990,
[59]	Moltrecht, Martin	Die Anwendung der Gebrauchswert-Kosten-Analyse bei Investitionsentscheidungen: Leuna-Merseburg, Techn. Hochsch., Diss., 1975
[60]	Monolux, Bill; Kostka, Jim	A r/m producer locks at washoutsystem,- Reclaimed material savings offset waste disposal costs -; Modern Concrete (45), Chicago, Ill. Sep. 1981, S. 97-101
[61]	Negaard, Jörg	Kosten biologischer Abwasserreinigung: Zürich, Eidgenössischen Technischen Hochschule, Diss., 1975
[62]	N.N.	Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e. V. (BTB): Transportbeton im Werk und auf der Baustelle. Moers: Brendow, 3. Auflage, Mai 1992
[63]	N.N.	Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e. V. (BTB): Chronik 2003
[64]	N.N.	Baustoffrecycling. Zement & Beton, 4/90, S. 15
[65]	N.N.	CIM - Das unbekannte Wesen, Einsatz in der Zement- und Transportbetonindustrie ; beton, Heft 2, 1988, S. 66-67
[66]	N.N.	Mischer, Misch- und Dosieranlagen,- Neuheiten, Verbesserungen und Weiterentwicklungen -; beton, Heft 10, 1990, S. 424-426
[67]	N.N.	Neue Anlage zur Industriewasser- und Feststoffseparierung nach dem Baukastenprinzip. Betonwerk+Fertigteiltechnik 4/76
[68]	N.N.	Neues Recycling-System;
[69]	N.N.	Waschanlagen für Fahrmischer sparen Wasser, Zeit und Kanalgebühren. Das Baugewerbe, Heft 16, 1974, S. 34-37
[70]	N.N.	Bedeutung des Feinstkornanteils in gebrochenen Zuschlagstoffen für die Eigenschaften des Betons; Bauplanung - Bautechnik, 42. Jg., Heft 3, März 1988
[71]	N.N.	GRAINsoft GmbH, Chemnitzer Straße 40, 09599 Freiberg, PMP Compact Die Software für die mechanische Verfahrenstechnik, Teil 2.1, Class Trennkurve, Version 3.1 (Oktober 1998) Benutzerhandbuch.
[72]	N.N.	BÜV TB Technische Durchführungsbestimmungen des Bundesüberwachungsausschusses des Bundesüberwachungs- und Zertifizierungsverbandes Transportbeton e.V. zur Anwendung der Restwasser-Richtlinie bei der Eigen- und Fremdüberwachung im Transportbetonwerk
[73]	N.N.	Die Rolle des Mehlkorns in der Betonmischung. CEMENTBULLETIN, Jahrgang 54, Nr. 6, Juni 1986
[74]	N.N.	Anlagen und Geräte zur Herstellung und Lieferung von Transportbeton. Bauwirtschaft 22 (Mai1974)
[75]	N.N.	Aufbereitung von Restbeton. Steine+Erden 2/92, S. 61- 63
[76]	N.N.	Recycling von Restbeton. Steine + Erden 3/1995, S. 50-56.
[77]	N.N.	Restbeton-Recyclinganlagen für Betonwerke. WLB Wasser, Luft und Boden 6/1999 S. 58-59.
[78]	Parker, C. Leon; Slimak, Michael W.	Waste Treatment and Disposal Costs for the Ready-Mixed Concrete Industry; ACI Journal, 7/77, S. 281-287
[79]	Pistilli, M. F.; Peterson, C. F.	Properties and possible recycling of solid waste from ready-mixed concrete. Cement and Concrete research, Vol. 5, 1975, S. 249-260
[80]	Plitt, L.R.	The Analysis of Solid-Solid Separations in Classiefiers, The Can-Mining and Metallurgical 64 (1971) 708, S. 42-97
[81]	Pressmar, Dieter B.	Die Kosten-Leistungsfunktion in industriellen Produktionsanlagen.- Eine theoretische und empirische Untersuchung zur betriebswirtschaftlichen Produktions- und Kostentheorie,- Hamburg, Universität, Diss., 1968
[82]	Regelwerk: ATV Arbeitsblatt A 102	Allgemeine Hinweise für die Planung von Abwasser-ableitungsanlagen und Abwasserbehandlungsanlagen bei Industrie- und Gewerbebetrieben. Ein Regelwerk der Abwassertechnischen Vereinigung e. V. in Zusammenarbeit mit dem Verband Kommunaler Städtereinigungsbetriebe (VKS), St. Augustin, November 1990
[83]	RegelwerkW: ATV Merkblatt M 761	Abwasser aus Betrieben der Steine- und Erden-Industrie. Ein Regelwerk der ATV in Zusammenarbeit mit dem VKS, St. Augustin, März 1989

[84]	Regelwerk:	DIN 4226. Teil 1. Zuschlag für Beton - Zuschlag mit dichtem Gefüge; Begriffe, Bezeichnung und Anforderungen -. Berlin: Beuth, Juli 2001
[85]	Regelwerk:	DIN 4030. Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase. Ausgabe Juni 1991
[86]	Regelwerk:	DIN 28130-3, Ausgabe: 1983-10; Rührbehälter mit Rührwerk, Rührantrieb, Benennungen, Bauteilekombination, Übersicht, Berlin: Beuth
[87]	Regelwerk:	DIN 28131, Ausgabe 1992-09, Rührer und Stromstörer für Rührbehälter, Formen, Benennungen und Hauptmaße, Berlin: Beuth
[88]	Regelwerk: Deutschen Beton-Verein E. V.	Merkblatt, Zugabewasser für Beton - Merkblatt für die Vorabprüfung und Beurteilung vor Baubeginn sowie die Prüfungswiederholung während der Bauausführung -. Fassung Januar 1982
[89]	RW: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton	Richtlinie, Alkalireaktion im Beton - Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton. Berlin, Köln: Beuth Verlag, Dezember 1997
[90]	Regelwerk: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton	Richtlinie für Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel. Berlin, Köln: Beuth Verlag, Juli 1995
[91]	Ready Mixed Concrete Congress	Congress Reports: X European Ready Mixed Concrete Congress, 23-26 June 1992
[92]	Readymix AG	Transportbeton Praxis: Ein Ratgeber für den Bau.- Lage/Lippe: Druckhaus Haberbeck, 1992 (3. bearb. Aufl.)
[93]	Rechenberg, W./ Siebel, E.	Chemischer Angriff auf Beton: Hinweise zur Anwendung der DIN 4030. Bearb. im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf.- Düsseldorf: Beton-Verlag, 1992, (Schriftenreihe der Zementindustrie; H. 53)
[94]	Richartz, W.	Zusammensetzung und Eigenschaften von Flugaschen; Zement-Kalk-Gips, Heft 2, 1984, S.62-71
[95]	Riechers, Hans-Joachim	Zulässiger Mehlkorngehalt,- Erläuterungen und Diagramme zu DIN 1045 -; beton, Heft 10, 1990, S. 417
[96]	Riehle; Rinza; Schmitz	Systemtechnik in Betrieb und Verwaltung; Teil 1 Grundlagen und Methoden. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1978
[97]	Riker, Rudolf	Die Behandlung von Restbeton; beton 7/78, S. 235-240
[98]	Riker, Rudolf	Neue Erkenntnisse bei der Aufbereitung von Rest- und Rückbeton, Betonwerk + Fertigteiltechnik, Heft 9, 1983, S. 569-573
[99]	Riker, Rudolf	Restbeton, wie behandeln? - rationelle Entsorgung, Wiedergewinnung, erstaunliche Einsparungen-; baupraxis, Heft 4, 1979, S. 7-12
[100]	Riker, Rudolf	Neue Erkenntnisse bei der Aufbereitung von Rest- und Rückbeton, Teil 2.- New methods for reprocessing leftover and returned concrete, part 2-; Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 10, 1983, S. 634-637
[101]	Ronca, Karl	Die Auswahl von Investitionen in betriebswirt-schaftlicher Sicht: St. Gallen, Hochschule, Diss.-Nr.550: Zürich, Juris, 1975
[102]	Rumpf	Mechanische Verfahrenstechnik; Verl. Hauser Verlag, München Wien, 1975
[103]	Rostasy, Ferdinand S./ Ranisch, Ernst-Holger.	Einfluß des Mehlkorns auf die Betoneigenschaften; beton, Heft 1, 1984, S. 19-22
[104]	Sampaio, J.	Recycled water used in the ready-mixed concrete plant of Betopal, S.A., in Oporto. TB-Kongress in Madrid 6.92
[105]	Schmitz, Heiner	Systemtechnik in Betrieb und Verwaltung.- Teil 2. Verfahren und praktische Beispiele zur Abwicklung komplexer Aufgaben.- Düsseldorf: VDI-Verlag. Verlag d. Vereins Dt. Ingenieure, 1978
[106]	Schneider Bautabellen	Bautabellen : Werner Verlag., 8. Auflage, 1998
[107]	Scholz, Andreas	Planung und Disposition,- EDV-Einsatz im Transportbetonwerk -; beton, Heft 3, 1989, S.134-135
[108]	Schubert, Heinrich	Mechanische Verfahrenstechnik
[109]	Schubert, Heinrich	Aufbereitung min. Rohstoffe.-Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie., 4., stark überarbeitete Auflage, 1989
[110]	Schumann, Manfred	Die Kostenoptimale Betriebsgröße in der Betonindustrie: Dresden, Technischen Universität, Habilitataionsschrift, 1967
[111]	Sonnenberg, Richard	Recyclinganlagen für Frischbeton. Beton, Heft 6, 1999, S. 342
[112]	Sonnenberg, Richard	Recycling von Schmutzwasser und Frischbeton. Beton, Heft 6, 2000, S. 318

[113]	Schütz, Michael	Anwendung der Methoden der Systemtechnik bei dem Entwurf von Kläranlagen: Berlin, Technischen Universität, Diss., 1973
[114]	Schwarz	Neue Anlage zur Industriewasser- und Feststoffseparierung nach dem Baukastenprinzip, Regenerierung von Schlamm- und Umlaufwasser, Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 4, 1976, S. 199
[115]	Stieß, Matthias	Mechanische Verfahrenstechnik 1.-Berlin,Heidelberg,New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest: Springer-Verlag, 1992
[116]	Swoboda, Hans Wolfgang	Untersuchung des Ausfallverhaltens von Baumaschinen, Systematische Schadendatenerfassung zur Planung der Instandsetzung im Baubetrieb. Braunschweig, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, Diss., 1978
[117]	Theiner, Josef	Restbeton-Recycling, Systeme und Technologien für Restbeton-Aufbereitungsanlagen; beton 4/79, S. 127-132
[118]	Theiner, Josef	Erhöhte Wirtschaftlichkeit im Betonwerk durch Wasser und Schlammrecycling. Betonwerk + Fertigteiltechnik, Heft 4, 1976, S. 202
[119]	Verein Deutscher Zementwerke	Abschlußbericht B1547/97774/98322 zum Forschungsvorhaben Nr. 3146 der FTB „Analyse von Restwasserinhaltsstoffen“, 1999
[120]	Verein Deutscher Zementwerke	Schlußbericht AiF-Vorhaben-Nr. 11511N „Einfluß von Restwasser aus dem Frischbetonrecycling auf die Eigenschaften von Frisch- und Festbeton“, Entwurf, April 2000
[121]	Verein Deutscher Zementwerke	Zement Taschenbuch. Wiesbaden/Berlin: Bauverlag, 1984, (48. Ausgabe)
[122]	Voit, Harald ; Mersmann, Alfons	Allgemeingültige Aussage zur Mindest-Rührerdrehzahl beim Suspendieren; Chem.-Ing.-Tech.57 (1985) Nr. 8, S. 692-693
[123]	Weber, Jürgen	Kostenrechnung im Mittelstand. Stuttgart: Poeschel 1991 (Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Hochschule für Unternehmensführung Koblenz: Management; 3)
[124]	Weber, Robert	Guter Beton: Ratschläge für die richtige Betonherstellung/ bearb. von Robert Weber; Rudolf Tegelaar. Mitarb. der früheren Aufl.: Herbert Schwara; Rolf Soller. Hrsg. von der Bauberatung Zement; Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V. - 17. Aufl. - Düsseldorf: Beton-Verlag, 1991
[125]	Weiskircher, Franz	Recyclinganlage für Betonrückstände und Spülwasser; BMT 4, August 1988
[126]	Weiss, Ernst-August	Einflußfaktoren der Kosten von Wohngebäuden: Bonn, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Diss., 1971.
[127]	Werth, Percy	Entscheidungskriterien für das Recycling von Abfallstoffen unter dem Gesichtspunkt des Energieeinsatzes.- Beispiel: Altreifenbeseitigung-: Berlin, Technischen Universität, Diss., 1977
[128]	Wesche, Karlhans	Baustoffe für tragende Bauteile. - Wiesbaden, Berlin: Bauverlag. Bd. 1. Baustoffkenngrößen, Meßtechnik, Statistik. - 2., neubearb. u. erw. Aufl. -1977
[129]	Wesche, Karlhans	Baustoffe für tragende Bauteile. - Wiesbaden, Berlin: Bauverlag. Bd. 2. Beton: Bindemittel, Zuschlag, Normal- u. Leichtbeton, Beständigkeit sowie Mörtel- u. Mauerwerk (nichtmetall.-anorgan. Stoffe). - 2., neubearb. Aufl. - 1981
[130]	Wiedenroth	Die Bestimmung der Feststoffkonzentration beim hydraulischen Feststofftransport; Wiesbaden: Aufbereitungs-Technik, Nr. 8, 1980, S. 402-409
[131]	Wischers, Gerd/ Krell, Jürgen	Einfluß der Feinststoffe im Beton auf Konsistenz, Festigkeit und Dauerhaftigkeit; beton, Heft 9, 1988, S. 356-359, Heft 10, 1988 S. 401-404
[132]	Wischers, Gerd/ Manns, Wilhelm	Ursachen für das Entstehen von Rissen in jungem Beton; beton, (1973) 4, S. 167-171 und (1973) 5, S. 222-228
[133]	Wischers, Gerd/ Richartz, Werner	Einfluß der Bestandteile und der Granulometrie des Zements auf das Gefüge des Zementsteins; beton (1982) 9, S. 337-341 und (1982) 10, S. 379-386
[134]	Zangemeister, Christof	Nutzwertanalyse in der Systemtechnik.- Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 4. überarb. Aufl., Berlin: Zippel, 1976
[135]	Gesetzestexte	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG (idF v. 27.09.1994) § 4 Abs. 1 und 2
[136]	Gesetzestexte	Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall-idF v. 12.03.1991, Teil 1 Abs.4.3 (GMBL.S.139, ber. S. 469)
[137]	Gesetzestexte	Rahmen-Abwasser VwV (Anhang Nr. 26) idF v. 31.07.96 (GMBL 1996)

ANHANG 1

Verifizierung anhand von Praxisbeispielen

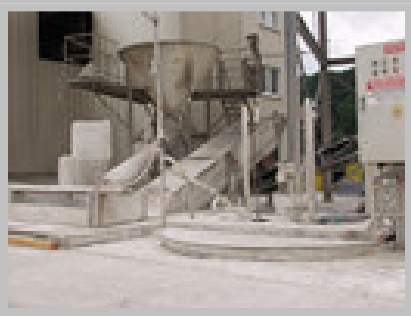
Praxisbeispiel 1

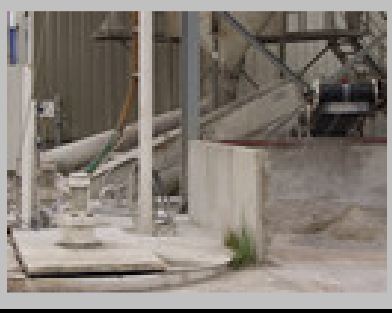
Restbetonrecyclinganlage der Firma Rennsteig Transportbeton GmbH & Co. KG
im Werk Rudolstadt, Oststraße 55.

Bei diesem Transportbetonwerk handelt es sich um eine im Jahr 1992 errichtete Vertikalanlage mit Elevatorbeschickung.

Die Restbetonrecyclinganlage wurde ebenfalls im Jahr 1992 in Betrieb genommen.
Der mechanische Klassierer ist Teilversenkt, und die Suspensionsbecken sind Unterflur angeordnet.

Praxisbeispiel 1: Recyclinganlage in Rudolstadt				
Qualitäts-sicherung der Recycling-produkte	PZ 1 Optimale Wiederver-wendung des Restbeton-zuschlags		**1 Weitere Klassierung**	Gewicht 0,1200
			2 Getrenntes Lagern und Dosieren	Teilnutzwert
			3 Volumetrisches Abschätzen	0,1200
	PZ 2 Optimale Art der Dichte-messung		1 Automatisch	Gewicht 0,2800
			2 Händisch mit Pyknometer	Teilnutzwert
			3 Händisch mit Aräometer	0,5600
Mini-mierung der Ablager-ungen	PZ 3 Optimaler Sus-pendier-zustand		1 Vollständige Sus-pension erreicht	Gewicht 0,0500
			2 Vollständige Suspen-sion erreicht ohne Überprüfung d. Leistung	Teilnutzwert
			3 Vollständige Sus-pension nicht erreicht	0,1000
	PZ 4 Optimale Ausfüh-rung im Grundriss		**1 Rund ohne Stromstörer**	Gewicht 0,0250
			2 Rechteckig	Teilnutzwert
			3 Rund mit Stromstörer	0,0250
	PZ 5 Optimale Aus-führung in der Ansicht		1 Kugelboden	Gewicht 0,0250
			2 Klöpperboden	Teilnutzwert
			3 Flachboden	0,0750
	PZ 6 Minimie-rung der Ablager-ungen bei der Führung von MS6		1 Positives starkes Gefälle	Gewicht 0,0250
			2 Positives flaches Gefälle	Teilnutzwert
			3 Negatives Gefälle	0,0500

Mini-mierung der Ablager-ungen	PZ 7 Mini-mierung der Ab-lagerungen bei der Führung von MS5		1 SB nahe MA mit TP	Gewicht 0,0250
			2 SB nahe MA mit SP/ SB fern MA mit TP	Teilnutzwert 0,0500
			3 SB fern MA mit SP	
Best-mögliche Bemessung	PZ 8 Optimale Auswasch-leistung	ohne Bild	**1** $\dot{V}_{IST} = \dot{V}_{Soll}$	Gewicht 0,0900
			2 $\dot{V}_{IST} > \dot{V}_{Soll}$	Teilnutzwert 0,0900
			3 $\dot{V}_{IST} < \dot{V}_{Soll}$	
	PZ 9 Optimales Trenn-verhalten	ohne Bild	1 EDS krit ermittelt	Gewicht 0,0900
			2 [-]	Teilnutzwert 0,2700
			3 EDS krit nicht ermittelt	
	PZ 10 Optimale Suspen-dierraum-größe	ohne Bild	1 Berechnung durchge-führt	Gewicht 0,0900
			2 [-]	Teilnutzwert 0,2700
			3 Berechnung nicht durchgeführt	
Best-mögliche Betriebs-praktika-bilität	PZ 11 Optimale Versteti-gung der Rest-wasser-temperatur		**1 Unterflur**	Gewicht 0,0375
			2 Teilversenkt	Teilnutzwert 0,0375
			3 Überflur	
	PZ 12 Optimale Anordnung des MK in Bezug zu Gelände-oberkante		1 Überflur	Gewicht 0,0200
			2 Teilversenkt	Teilnutzwert 0,0400
			3 Unterflur	

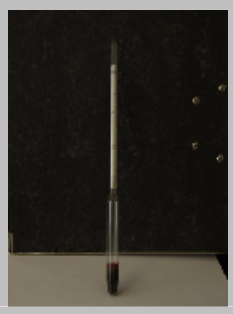
Best-mögliche Betriebs-praktika-bilität	PZ 13 Automati-sierung der Spül-wasserzu-gabe		1 Voreinstellung vorhanden	Gewicht 0,0200
			2 [-]	Teilnutzwert
			3 Voreinstellung nicht vorhanden	0,0600
	PZ 14 Bestmög-liche Führung von MS 3		**1 Vorklassierer**	Gewicht 0,0200
			2 Reservebecken	Teilnutzwert
			3 Mechanischer Klassierer	0,0200
	PZ 15 Bestmög-liche Führung von MS 1		**1 ht < hmin,F**	Gewicht 0,0200
			2 [-]	Teilnutzwert
			3 ht > hmin,F	0,0200
	PZ 16 Bestmög-liche Führung von MS 2		**1 MS2cI / MS2cII MS2b**	Gewicht 0,0200
			2 [-]	Teilnutzwert
			3 MS2a	0,0200
	PZ 17 Bestmög-liche Führung von MS 4		1 Befüllung in bereit-stehendes Fahrzeug	Gewicht 0,0200
			2 [-]	Teilnutzwert
			3 Schüttkegel	0,0600
Best-mögliche Berück-sichtigung der Interde-pendenzen	PZ 18 Bestmög-liche Anord-nung von MK zu SB in Bezug zur Ge-ländeober-kante		**1 > 10 Vergleiche Zielkomplementarität**	Gewicht 0,0225
			2 [-]	Teilnutzwert
			3 < 10 Vergleiche Zielkomplementarität	0,0225
			Gesamtnutzwert	1,8900

Praxisbeispiel 2

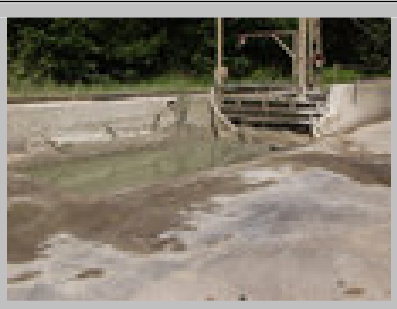
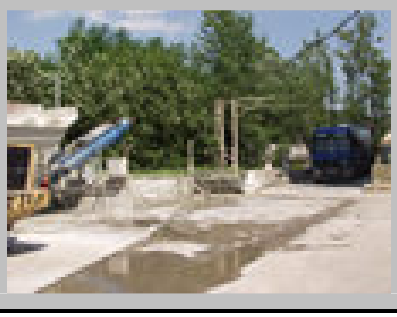
Restbetonrecyclinganlage der Firma UNION-BETON GmbH & Co. KG
im Werk Dortmund, Sudkamp 14.

Bei diesem Transportbetonwerk handelt es sich um eine im Jahr 1972 errichtete Vertikalanlage mit Förderbandbeschickung.

Die Restbetonrecyclinganlage wurde im Jahr 1988 in die bestehenden Absetz-einrichtungen integriert.
Der mechanische Klassierer ist Überflur, und die Suspensionsbecken sind Unterflur angeordnet.

Praxisbeispiel 2: Recyclinganlage in Dortmund				
Qualitäts-sicherung der Recycling-produkte	PZ 1 Optimale Wiederver-wendung des Restbeton-zuschlags		1 Weitere Klassierung	Gewicht 0,1200
			2 Getrenntes Lagern und Dosieren	Teilnutzwert
			3 Volumetrisches Abschätzen	0,3600
	PZ 2 Optimale Art der Dichte-messung		1 Automatisch	Gewicht 0,2800
			2 Händisch mit Pyknometer	Teilnutzwert
			3 Händisch mit Aräometer	0,8400
Mini-mierung der Ablager-ungen	PZ 3 Optimaler Sus-pendier-zustand		1 Vollständige Sus-pension erreicht	Gewicht 0,0500
			2 Vollständige Sus-pension erreicht ohne Überprüfung d. Leistung	Teilnutzwert
			3 Vollständige Sus-pension nicht erreicht	0,1000
	PZ 4 Optimale Ausfüh-rung im Grundriss		1 Rund ohne Stromstörer	Gewicht 0,0250
			2 Rechteckig	Teilnutzwert
			3 Rund mit Stromstörer	0,0500
	PZ 5 Optimale Aus-führung in der Ansicht		1 Kugelboden	Gewicht 0,0250
			2 Klöpperboden	Teilnutzwert
			3 Flachboden	0,0750
	PZ 6 Minimie-rung der Ablager-ungen bei der Führung von MS6		1 Positives starkes Gefälle	Gewicht 0,0250
			2 Positives flaches Gefälle	Teilnutzwert
			3 Negatives Gefälle	0,0500

Minimierung der Ablagerungen	PZ 7 Minimierung der Ablagerungen bei der Führung von MS5		**1 SB nahe MA mit TP**	Gewicht 0,0250
			2 SB nahe MA mit SP/ SB fern MA mit TP	Teilnutzwert
			3 SB fern MA mit SP	0,0250
Bestmögliche Bemessung	PZ 8 Optimale Auswaschleistung	ohne Bild	1 $\dot{V}_{IST} = \dot{V}_{Soll}$	Gewicht 0,0900
			2 $\dot{V}_{IST} > \dot{V}_{Soll}$	Teilnutzwert
			3 $\dot{V}_{IST} < \dot{V}_{Soll}$	0,1800
	PZ 9 Optimales Trennverhalten	ohne Bild	1 EDS krit ermittelt	Gewicht 0,0900
			2 [-]	Teilnutzwert
			3 EDS krit nicht ermittelt	0,2700
	PZ 10 Optimale Suspendierraumgröße	ohne Bild	1 Berechnung durchgeführt	Gewicht 0,0900
			2 [-]	Teilnutzwert
			3 Berechnung nicht durchgeführt	0,2700
Bestmögliche Betriebspraktikabilität	PZ 11 Optimale Verstetigung der Restwassertemperatur		**1 Unterflur**	Gewicht 0,0375
			2 Teilversenkt	Teilnutzwert
			3 Überflur	0,0375
	PZ 12 Optimale Anordnung des MK in Bezug zu Geländeoberkante		**1 Überflur**	Gewicht 0,0200
			2 Teilversenkt	Teilnutzwert
			3 Unterflur	0,0200

Bestmögliche Betriebspraktikabilität	PZ 13 Automatisierung der Spülwasserzugabe		**1**	**Voreinstellung vorhanden**	Gewicht 0,0200
			2	[-]	Teilnutzwert
			3	Voreinstellung nicht vorhanden	0,0200
	PZ 14 Bestmögliche Führung von MS 3		**1**	**Vorklassierer**	Gewicht 0,0200
			2	Reservebecken	Teilnutzwert
			3	Mechanischer Klassierer	0,0200
	PZ 15 Bestmögliche Führung von MS 1		**1**	**ht < hmin,F**	Gewicht 0,0200
			2	[-]	Teilnutzwert
			3	ht > hmin,F	0,0200
	PZ 16 Bestmögliche Führung von MS 2		**1**	**MS2cI / MS2cII MS2b**	Gewicht 0,0200
			2	[-]	Teilnutzwert
			3	MS2a	0,0200
	PZ 17 Bestmögliche Führung von MS 4		1	Befüllung in bereitstehendes Fahrzeug	Gewicht 0,0200
			2	[-]	Teilnutzwert
			3	**Schüttkegel**	0,0600
Bestmögliche Berücksichtigung der Interdependenzen	PZ 18 Bestmögliche Anordnung von MK zu SB in Bezug zur Geländeoberkante		**1**	**> 10 Vergleiche Zielkomplementarität**	Gewicht 0,0225
			2	[-]	Teilnutzwert
			3	< 10 Vergleiche Zielkomplementarität	0,0225
			Gesamtnutzwert		2.4400

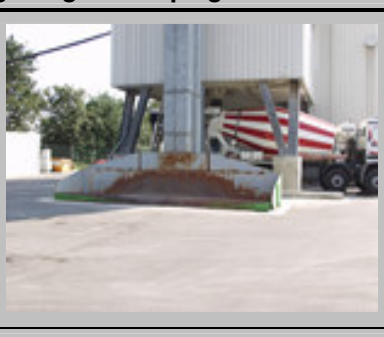
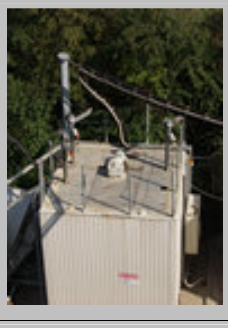
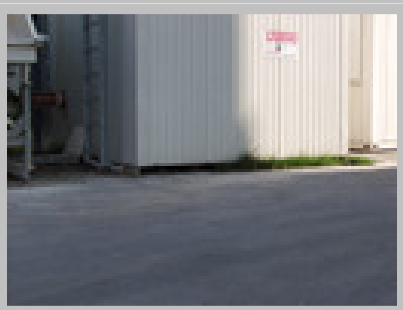
Praxisbeispiel 3

Restbetonrecyclinganlage der Firma th-beton GmbH & Co. KG
im Werk Leipzig, Söllichauerstraße 12.

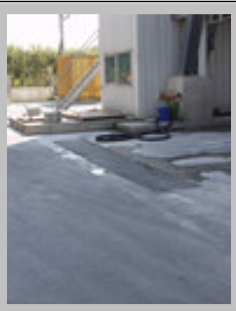
Bei diesem Transportbetonwerk handelt es sich um eine im Jahr 1994 errichtete Vertikalanlage mit Elevatorbeschickung.

Die Restbetonrecyclinganlage wurde ebenfalls im Jahr 1994 in Betrieb genommen.
Der mechanische Klassierer ist Überflur und die Suspensionsbecken sind ebenfalls Überflur angeordnet. Da nicht die Möglichkeit bestand, eine Anlage mit Schneckenklassierer und Überflur - Suspensionsbecken zu fotografieren, wurde eine Anlage mit einem mechanischen Klassierer aus einer Kombination aus Auswaschtrommel und Schneckenklassierer gewählt.
Auch hiermit lässt sich die Nutzwertanalyse exemplarisch darstellen.

Praxisbeispiel 3: Recyclinganlage in Leipzig

Qualitäts-sicherung der Recycling-produkte	PZ 1 Optimale Wiederver-wendung des Restbeton-zuschlags		1	Weitere Klassierung	Gewicht 0,1200
			2	**Getrenntes Lagern und Dosieren**	Teilnutzwert 0,2400
			3	Volumetrisches Abschätzen	
	PZ 2 Optimale Art der Dichte-messung		1	Automatisch	Gewicht 0,2800
			2	Händisch mit Pyknometer	Teilnutzwert 0,8400
			3	**Händisch mit Aräometer**	
Mini-mierung der Ablager-ungen	PZ 3 Optimaler Sus-pendier-zustand		1	Vollständige Sus-pension erreicht	Gewicht 0,0500
			2	**Vollständige Sus-pension erreicht ohne Überprüfung d. Leistung**	Teilnutzwert 0,1000
			3	Vollständige Sus-pension nicht erreicht	
	PZ 4 Optimale Ausfüh-rung im Grundriss		1	Rund ohne Stromstörer	Gewicht 0,0250
			2	**Rechteckig**	Teilnutzwert 0,0500
			3	Rund mit Stromstörer	
	PZ 5 Optimale Aus-führung in der Ansicht		1	Kugelboden	Gewicht 0,0250
			2	Klöpperboden	Teilnutzwert 0,0750
			3	**Flachboden**	
	PZ 6 Minimie-rung der Ablager-ungen bei der Führung von MS6		1	Positives starkes Gefälle	Gewicht 0,0250
			2	Positives flaches Gefälle	Teilnutzwert 0,0750
			3	**Negatives Gefälle**	

Minimierung der Ablagerungen	PZ 7 Minimierung der Ablagerungen bei der Führung von MS5		1 SB nahe MA mit TP	Gewicht 0,0250
			2 SB nahe MA mit SP/ SB fern MA mit TP	Teilnutzwert 0,0500
			3 SB fern MA mit SP	
Bestmögliche Bemessung	PZ 8 Optimale Auswaschleistung	ohne Bild	1 $\dot{V}_{IST} = \dot{V}_{Soll}$	Gewicht 0,0900
			2 $\dot{V}_{IST} > \dot{V}_{Soll}$	Teilnutzwert 0,2700
			3 $\dot{V}_{IST} < \dot{V}_{Soll}$	
	PZ 9 Optimales Trennverhalten	ohne Bild	1 EDS krit ermittelt	Gewicht 0,0900
			2 [-]	Teilnutzwert 0,2700
			3 EDS krit nicht ermittelt	
	PZ 10 Optimale Suspendierraumgröße	ohne Bild	1 Berechnung durchgeführt	Gewicht 0,0900
			2 [-]	Teilnutzwert 0,2700
			3 Berechnung nicht durchgeführt	
Bestmögliche Betriebspraktikabilität	PZ 11 Optimale Verstetigung der Restwassertemperatur		1 Unterflur	Gewicht 0,0375
			2 Teilversenkt	Teilnutzwert 0,1125
			3 Überflur	
	PZ 12 Optimale Anordnung des MK in Bezug zu Geländeoberkante		**1 Überflur**	Gewicht 0,0200
			2 Teilversenkt	Teilnutzwert 0,0200
			3 Unterflur	

Best-mögliche Betriebs-praktika-bilität	PZ 13 Automati-sierung der Spül-wasserzu-gabe		1 Voreinstellung vorhanden	Gewicht 0,0200
			2 [-]	Teilnutzwert 0,0600
			3 Voreinstellung nicht vorhanden	
	PZ 14 Bestmög-liche Führung von MS 3		1 Vorklassierer	Gewicht 0,0200
			2 Reservebecken	Teilnutzwert
			3 Mechanischer Klassierer	0,0600
	PZ 15 Bestmög-liche Führung von MS 1		1 ht < hmin,F	Gewicht 0,0200
			2 [-]	Teilnutzwert
			3 ht > hmin,F	0,0600
	PZ 16 Bestmög-liche Führung von MS 2		1 MS2cI / MS2cII MS2b	Gewicht 0,0200
			2 [-]	Teilnutzwert
			3 MS2a	0,0600
	PZ 17 Bestmög-liche Führung von MS 4		1 Befüllung in bereit-stehendes Fahrzeug	Gewicht 0,0200
			2 [-]	Teilnutzwert
			3 Schüttkegel	0,0600
Best-mögliche Berück-sichtigung der Interde-pendenzen	PZ 18 Bestmög-liche Anord-nung von MK zu SB in Bezug zur Ge-ländeober-kante		**1 > 10 Vergleiche Zielkomplementarität**	Gewicht 0,0225
			2 [-]	Teilnutzwert
			3 < 10 Vergleiche Zielkomplementarität	0,0225
			Gesamtnutzwert	2.6950

ANHANG 2

Versuchsergebnisse

Die in allen Tabellen und Grafiken angegebenen Zahlenwerte werden mit der Software i.d.R. mit 3 Stellen nach dem Komma angegeben. Es handelt sich hierbei nur um Rechengrößen und keinesfalls um eine derartige Genauigkeit. Sie sind bei Angabe als endgültige Werte grundsätzlich zu runden.

Versuch-Nr. 1

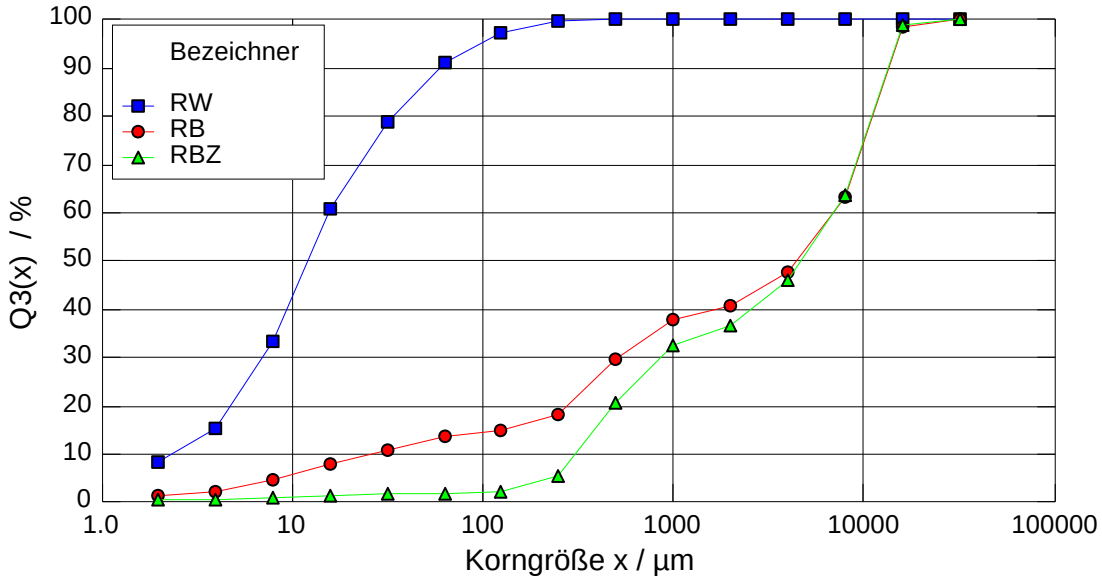
Serie LS 105 54, Durchsatz 5,41 kg/s

Korngröße			RW	RB	RBZ
Kornklassen			Q3(x)	Q3(x)	Q3(x)
µm			%	%	%
	<	2,000	8,08	1,18	0,11
2,000	-	4,000	14,90	2,02	0,19
4,000	-	8,000	32,86	4,11	0,45
8,000	-	16,000	60,65	7,43	0,96
16,000	-	31,500	78,35	10,62	1,32
31,500	-	63,000	90,61	13,23	1,50
63,000	-	125,000	96,96	14,48	1,65
125,000	-	250,000	99,39	17,92	5,31
250,000	-	500,000	99,88	29,22	20,29
500,000	-	1000,000	99,96	37,70	32,26
1000,000	-	2000,000	99,97	40,52	36,34
2000,000	-	4000,000	99,97	47,51	45,65
4000,000	-	8000,000	99,97	62,89	63,12
8000,000	-	16000,000	99,98	98,30	98,41
16000,000	-	32000,000	100,00	100,00	99,99
	>	32000,000	100,00	100,00	100,00

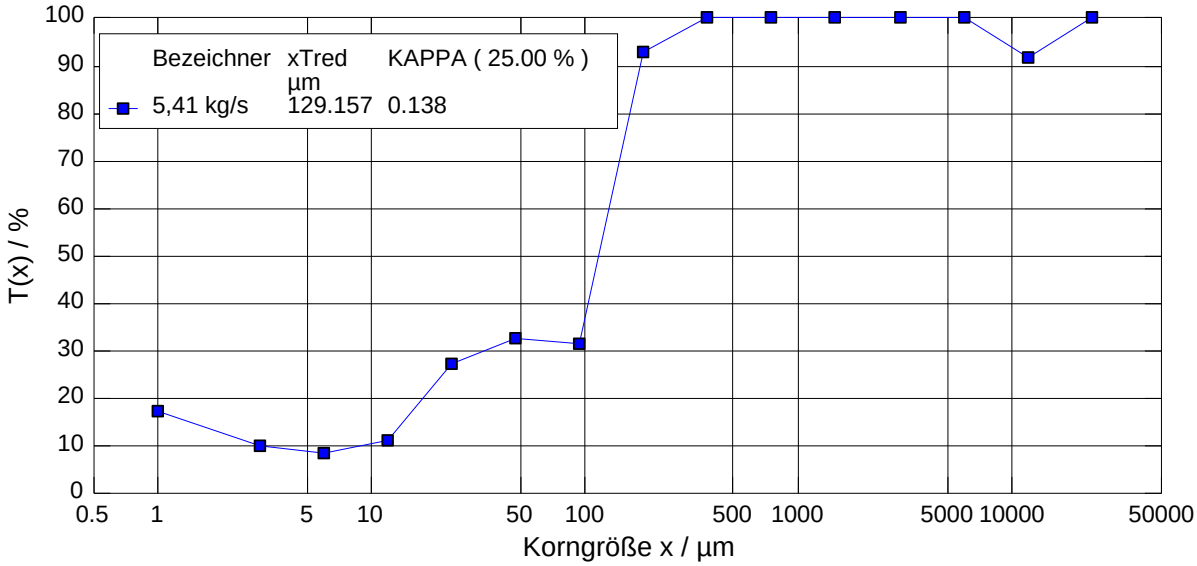
Korngröße			RW	RB	RBZ
Kornklassen			Fraktion p3	Fraktion p3	Fraktion p3
µm			%	%	%
	<	2,000	8,08	1,18	0,11
2,000	-	4,000	6,82	0,84	0,08
4,000	-	8,000	17,97	2,09	0,26
8,000	-	16,000	27,78	3,32	0,51
16,000	-	31,500	17,70	3,19	0,36
31,500	-	63,000	12,26	2,61	0,18
63,000	-	125,000	6,35	1,25	0,15
125,000	-	250,000	2,43	3,44	3,66
250,000	-	500,000	0,49	11,30	14,98
500,000	-	1000,000	0,08	8,48	11,97
1000,000	-	2000,000	0,00	2,82	4,08
2000,000	-	4000,000	0,00	6,99	9,31
4000,000	-	8000,000	0,00	15,38	17,47
8000,000	-	16000,000	0,01	35,41	35,29
16000,000	-	32000,000	0,02	1,70	1,58
	>	32000,000	0,00	0,00	0,01

Kenngröße		Restwasser	Restbeton	Restbetonzuschlag
Q3 (x=100.000 µm)	[%]	94,40	13,98	1,59
Q3 (x=200.000 µm)	[%]	98,42	16,54	3,85
x3 (Q=90.00 %)	[µm]	61,431	14124,823	14093,511
xm3	[µm]	33,597	5948,152	6159,904
x503	[µm]	12,934	4647,594	4995,993

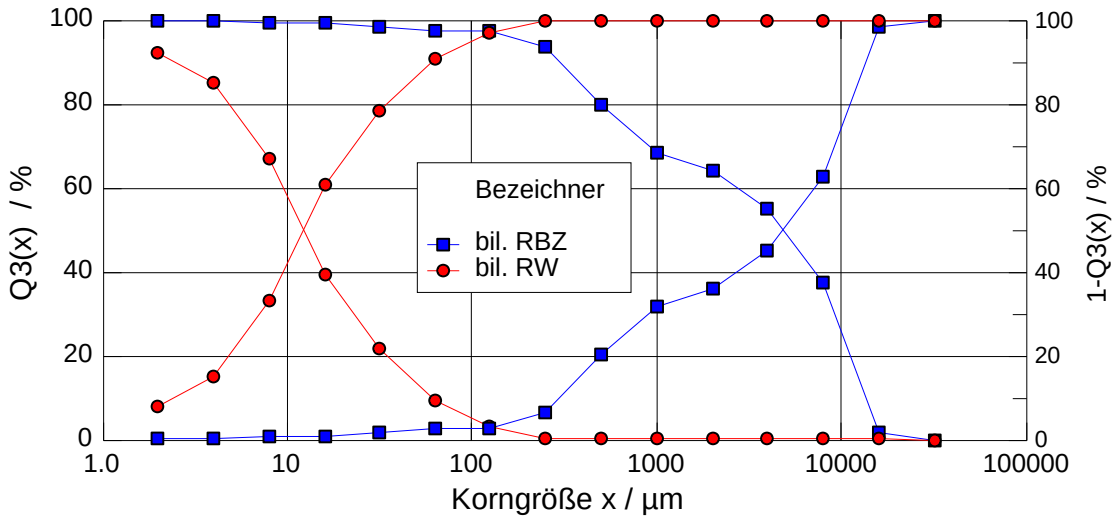
Körnungsdiagramm



Trenngradverlauf



Kornscheide



Versuch-Nr. 2

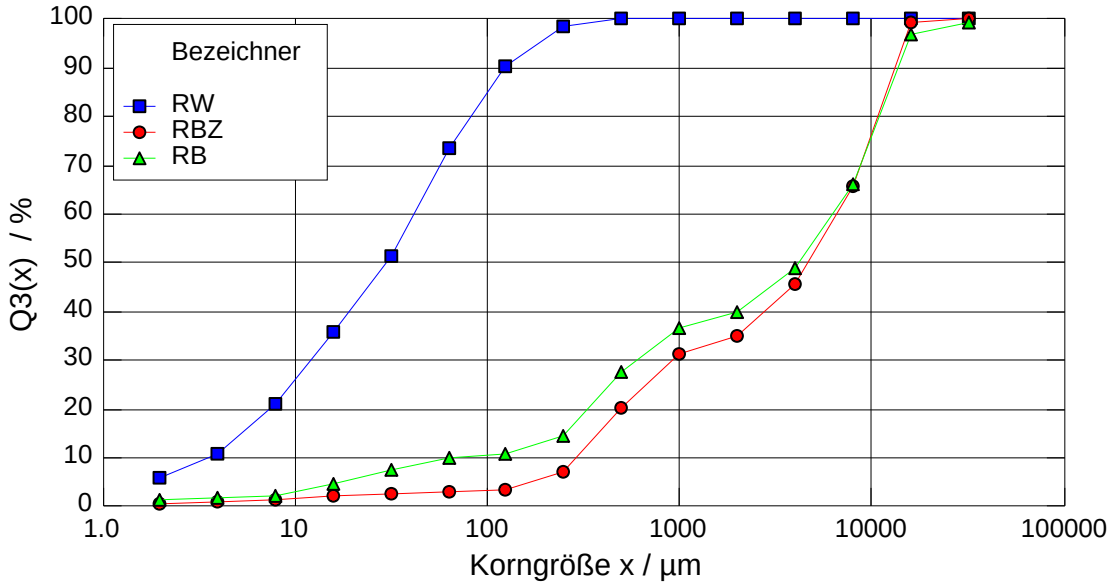
Serie LS 105 53, Durchsatz 8,99 kg/s

Korngröße			RW	RBZ	RB
Kornklassen			Q3(x)	Q3(x)	Q3(x)
µm			%	%	%
	<	2,000	5,57	0,26	0,84
2,000	-	4,000	10,55	0,42	1,33
4,000	-	8,000	20,81	0,89	1,64
8,000	-	16,000	35,29	1,77	4,14
16,000	-	31,500	51,14	2,42	7,02
31,500	-	63,000	73,19	2,81	9,57
63,000	-	125,000	90,06	3,11	10,38
125,000	-	250,000	98,34	6,79	13,94
250,000	-	500,000	99,77	20,07	27,15
500,000	-	1000,000	99,93	30,89	36,29
1000,000	-	2000,000	99,93	34,83	39,51
2000,000	-	4000,000	99,94	45,47	48,44
4000,000	-	8000,000	99,95	65,54	65,69
8000,000	-	16000,000	99,96	98,80	96,70
16000,000	-	32000,000	100,00	100,00	98,99
	>	32000,000	100,00	100,00	100,00

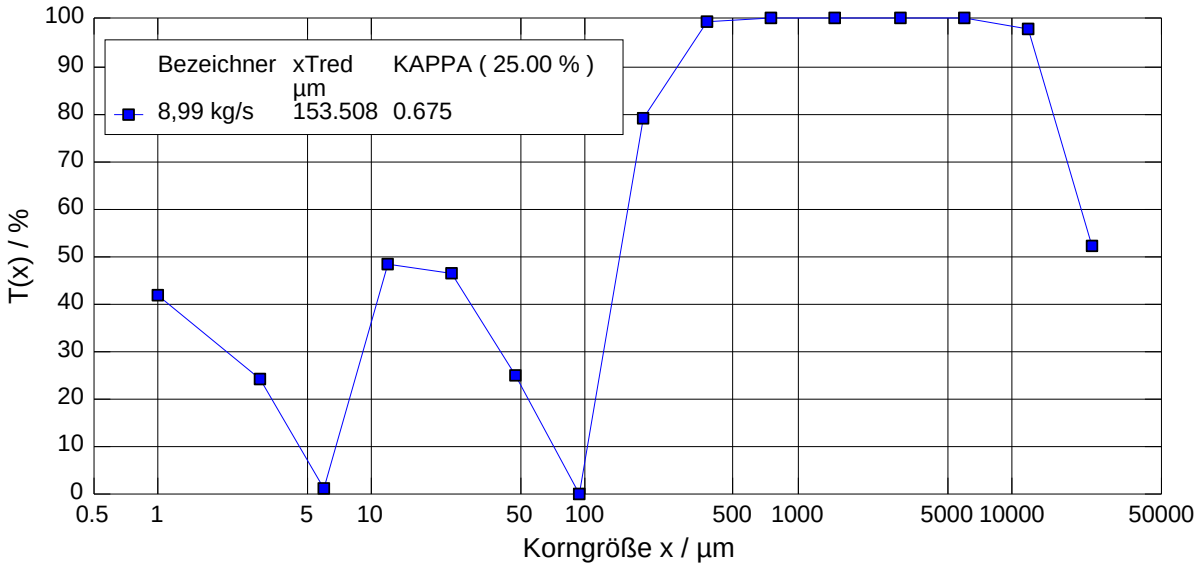
Korngröße			RW	RBZ	RB
Kornklassen			Fraktion p3	Fraktion p3	Fraktion p3
µm			%	%	%
	<	2,000	5,57	0,26	0,84
2,000	-	4,000	4,98	0,16	0,49
4,000	-	8,000	10,27	0,47	0,31
8,000	-	16,000	14,47	0,88	2,50
16,000	-	31,500	15,86	0,65	2,88
31,500	-	63,000	22,05	0,39	2,55
63,000	-	125,000	16,87	0,30	0,81
125,000	-	250,000	8,28	3,68	3,56
250,000	-	500,000	1,43	13,28	13,21
500,000	-	1000,000	0,16	10,82	9,14
1000,000	-	2000,000	0,00	3,94	3,22
2000,000	-	4000,000	0,00	10,64	8,93
4000,000	-	8000,000	0,01	20,07	17,25
8000,000	-	16000,000	0,02	33,26	31,01
16000,000	-	32000,000	0,04	1,20	2,29
	>	32000,000	0,00	0,00	1,01

Kenngröße		Restwasser	Restbetonzuschlag	Restbeton
Q3 (x=100.000 µm)	[%]	83,26	2,99	10,05
Q3 (x=200.000 µm)	[%]	95,03	5,32	12,52
x3 (Q=90.00 %)	[µm]	124,781	13883,343	14271,525
xm3	[µm]	66,085	6000,312	6153,754
x503	[µm]	30,383	4902,840	4361,739

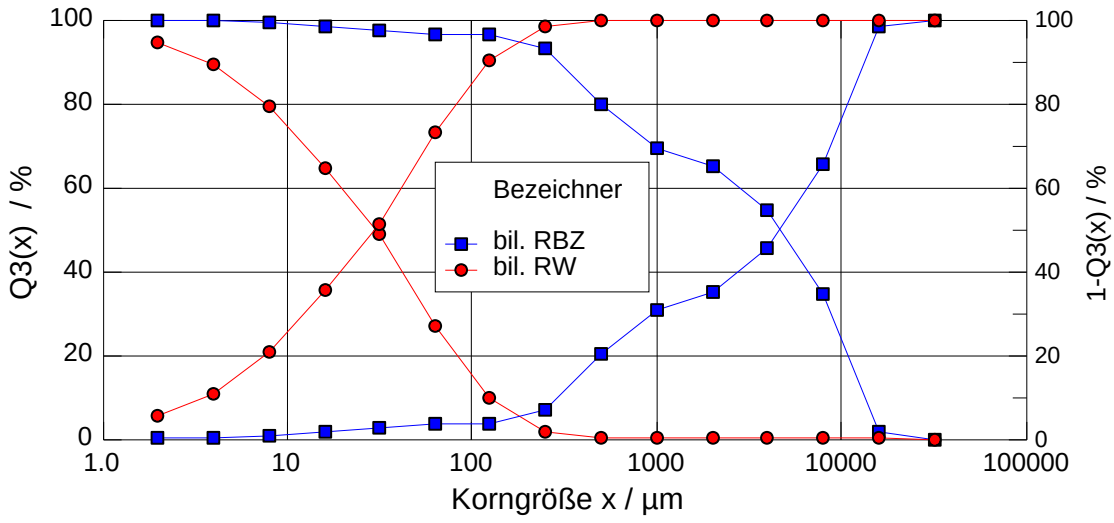
Körnungsdiagramm



Trenngradverlauf



Kornscheide



Versuch-Nr. 3

Versuch-Nr. 3

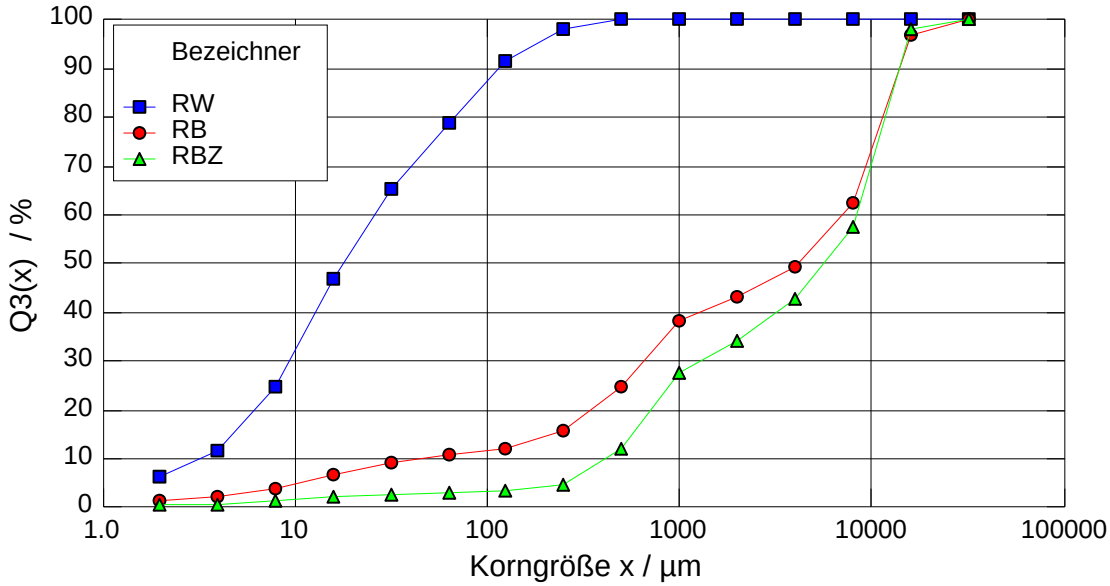
Lieferschein 9911, Durchsatz 16,4 kg/s

Korngröße			RW	RB.	RBZ
Kornklassen			Q3(x)	Q3(x)	Q3(x)
µm			%	%	%
	<	2,000	6,04	0,93	0,23
2,000	-	4,000	11,47	1,73	0,40
4,000	-	8,000	24,51	3,59	0,85
8,000	-	16,000	46,35	6,39	1,72
16,000	-	31,500	64,79	8,81	2,41
31,500	-	63,000	78,54	10,53	2,78
63,000	-	125,000	91,03	11,61	2,92
125,000	-	250,000	97,88	15,19	4,45
250,000	-	500,000	99,63	24,44	11,72
500,000	-	1000,000	99,99	38,09	27,21
1000,000	-	2000,000	99,99	42,82	33,76
2000,000	-	4000,000	99,99	49,05	42,29
4000,000	-	8000,000	99,99	61,90	57,33
8000,000	-	16000,000	100,00	96,64	97,79
16000,000	-	32000,000	100,00	100,00	100,00
	>	32000,000	100,00	100,00	100,00

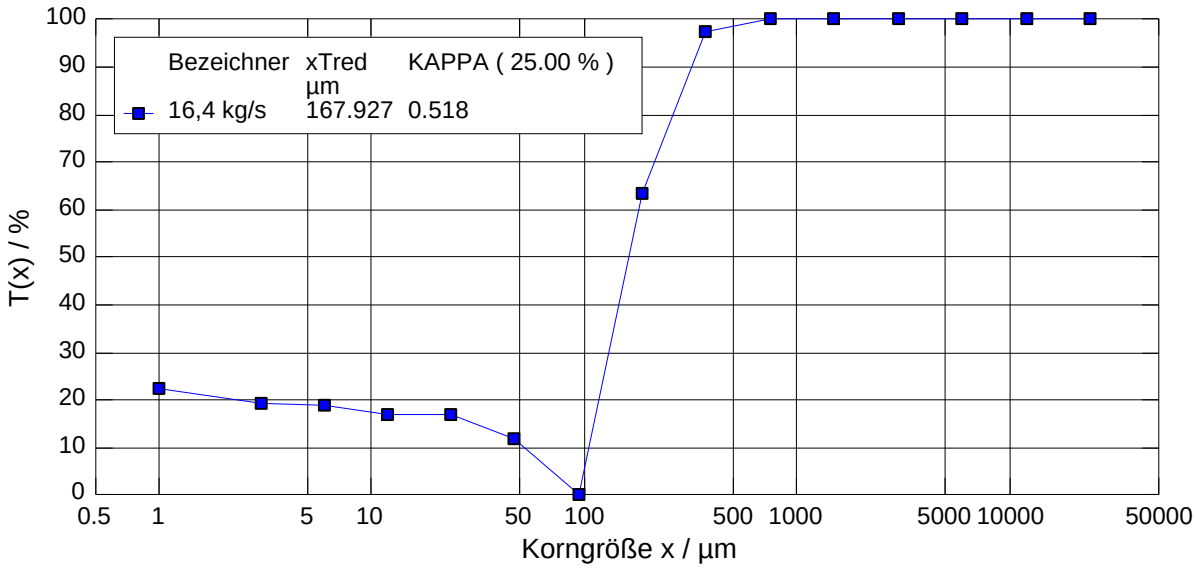
Korngröße			RW	RB	RBZ
Kornklassen			Fraktion p3	Fraktion p3	Fraktion p3
µm			%	%	%
	<	2,000	6,04	0,93	0,23
2,000	-	4,000	5,43	0,80	0,17
4,000	-	8,000	13,04	1,86	0,44
8,000	-	16,000	21,84	2,80	0,87
16,000	-	31,500	18,44	2,42	0,70
31,500	-	63,000	13,75	1,72	0,37
63,000	-	125,000	12,49	1,08	0,14
125,000	-	250,000	6,85	3,58	1,53
250,000	-	500,000	1,75	9,25	7,27
500,000	-	1000,000	0,37	13,65	15,49
1000,000	-	2000,000	0,00	4,73	6,55
2000,000	-	4000,000	0,00	6,23	8,53
4000,000	-	8000,000	0,00	12,85	15,04
8000,000	-	16000,000	0,00	34,74	40,46
16000,000	-	32000,000	0,00	3,36	2,21
	>	32000,000	0,00	0,00	0,00

Kenngröße		RW	RB	RBZ
Q3 (x=100.000 µm)	[%]	85,99	11,17	2,86
x3 (Q=90.00 %)	[µm]	119,886	14470,927	14459,713
xm3	[µm]	49,897	6150,709	6789,066
x503	[µm]	19,066	4295,720	6050,532

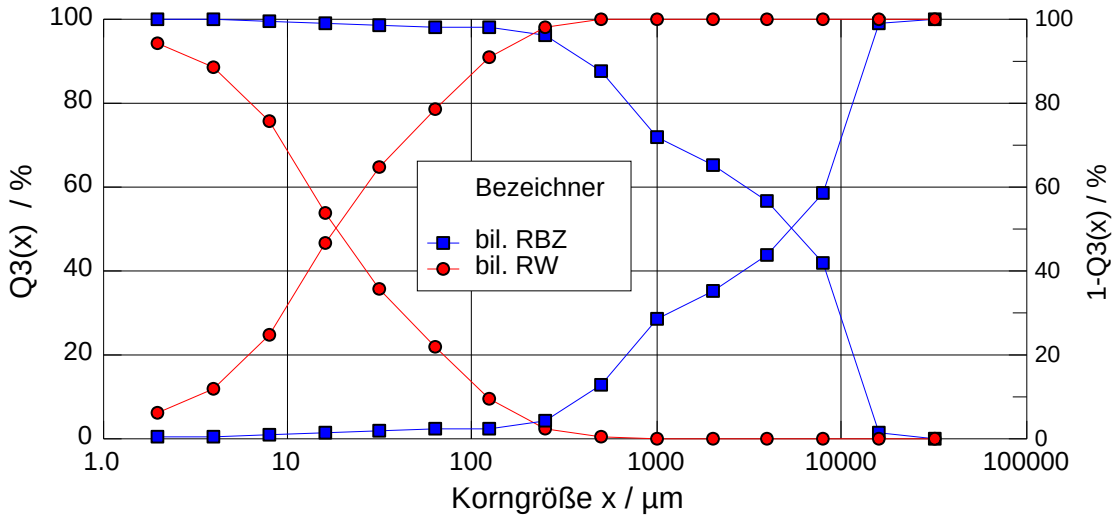
Körnungsdiagramm



Trenngradverlauf



Kornscheide



Versuch-Nr. 4

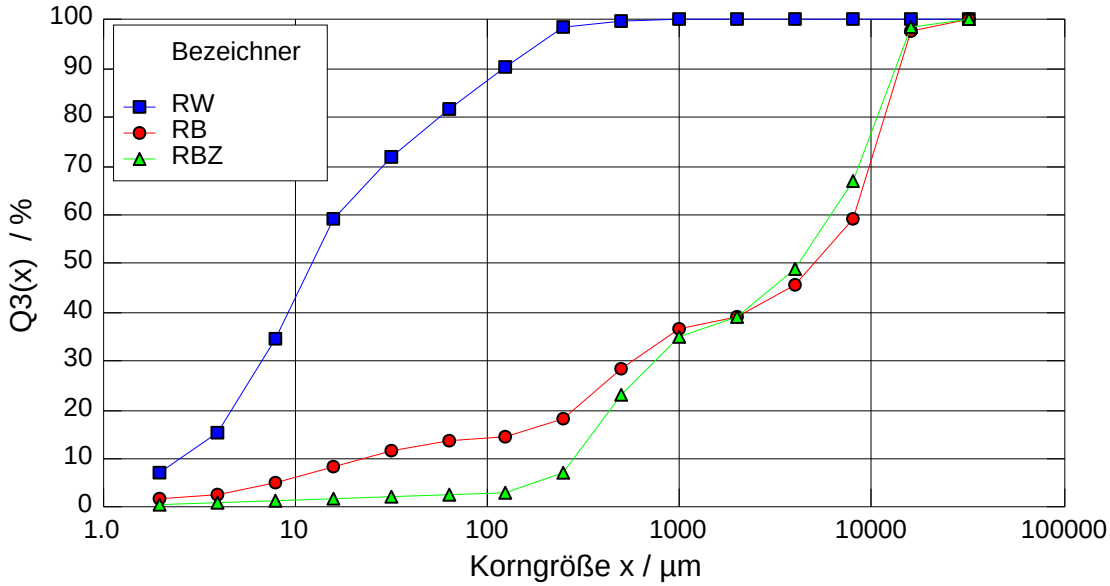
Serie LS 105 52, Durchsatz 18,1 kg/s

Korngröße			RW	RB	RBZ
Kornklassen			Q3(x)	Q3(x)	Q3(x)
µm			%	%	%
	<	2,000	6,94	1,23	0,26
2,000	-	4,000	14,88	2,21	0,46
4,000	-	8,000	34,07	4,63	0,96
8,000	-	16,000	58,64	8,15	1,57
16,000	-	31,500	71,32	11,12	1,92
31,500	-	63,000	81,29	13,35	2,23
63,000	-	125,000	90,04	14,28	2,48
125,000	-	250,000	98,03	17,85	6,87
250,000	-	500,000	99,54	28,23	22,64
500,000	-	1000,000	100,00	36,12	34,63
1000,000	-	2000,000	100,00	38,75	38,88
2000,000	-	4000,000	100,00	45,35	48,71
4000,000	-	8000,000	100,00	58,90	66,66
8000,000	-	16000,000	100,00	97,16	98,17
16000,000	-	32000,000	100,00	99,99	100,00
	>	32000,000	100,00	100,00	100,00

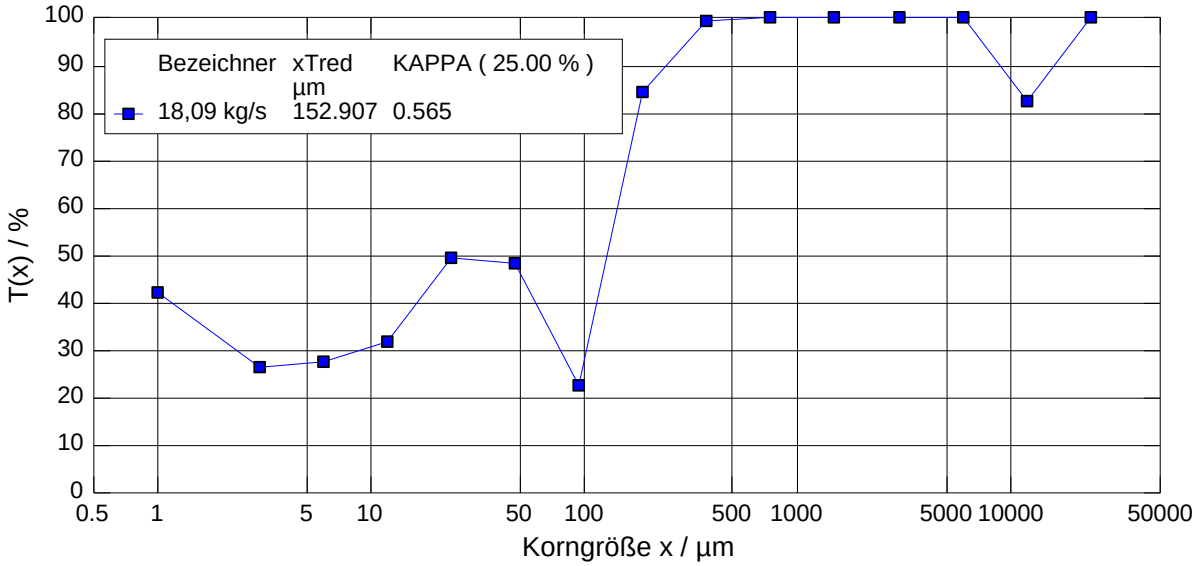
Korngröße			RW	RB	RBZ
Kornklassen			Fraktion p3	Fraktion p3	Fraktion p3
µm			%	%	%
	<	2,000	6,94	1,23	0,26
2,000	-	4,000	7,94	0,98	0,20
4,000	-	8,000	19,19	2,42	0,50
8,000	-	16,000	24,57	3,52	0,61
16,000	-	31,500	12,67	2,97	0,35
31,500	-	63,000	9,97	2,23	0,31
63,000	-	125,000	8,75	0,93	0,25
125,000	-	250,000	7,99	3,57	4,39
250,000	-	500,000	1,51	10,38	15,77
500,000	-	1000,000	0,46	7,89	11,99
1000,000	-	2000,000	0,00	2,63	4,25
2000,000	-	4000,000	0,00	6,60	9,83
4000,000	-	8000,000	0,00	13,55	17,95
8000,000	-	16000,000	0,00	38,26	31,51
16000,000	-	32000,000	0,00	2,83	1,83
	>	32000,000	0,00	0,01	0,00

Kenngröße		Restwasser	Restbeton	Restbetonzuschlag
Q3 (x=100.000 µm)	[%]	86,51	13,91	2,38
Q3 (x=200.000 µm)	[%]	94,83	16,42	5,11
x3 (Q=90.00 %)	[µm]	124,726	14502,875	13925,738
xm3	[µm]	45,093	6432,886	5813,920
x503	[µm]	13,186	5372,694	4287,465

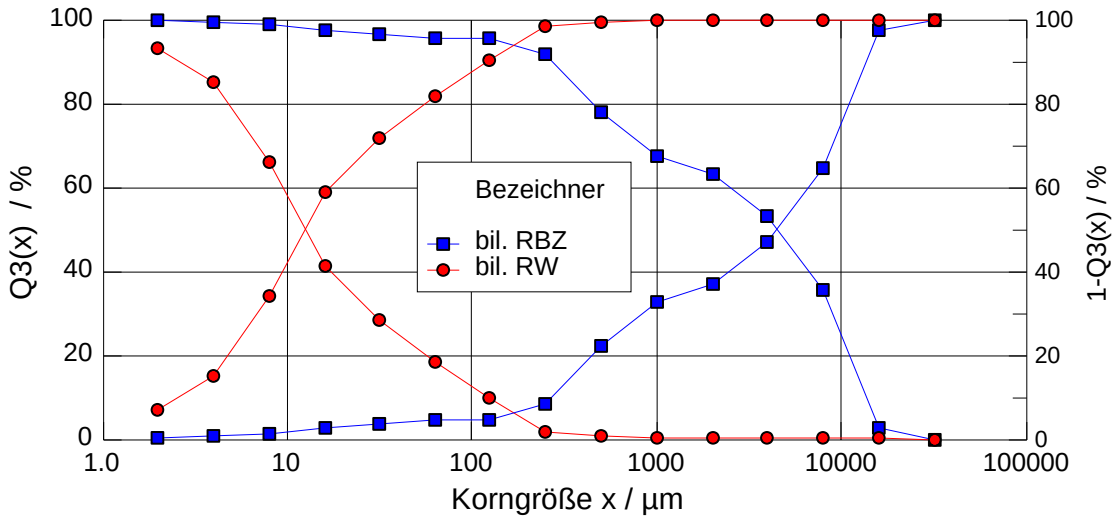
Körnungsdiagramm



Trenngradverlauf



Kornscheide



Versuch-Nr. 5

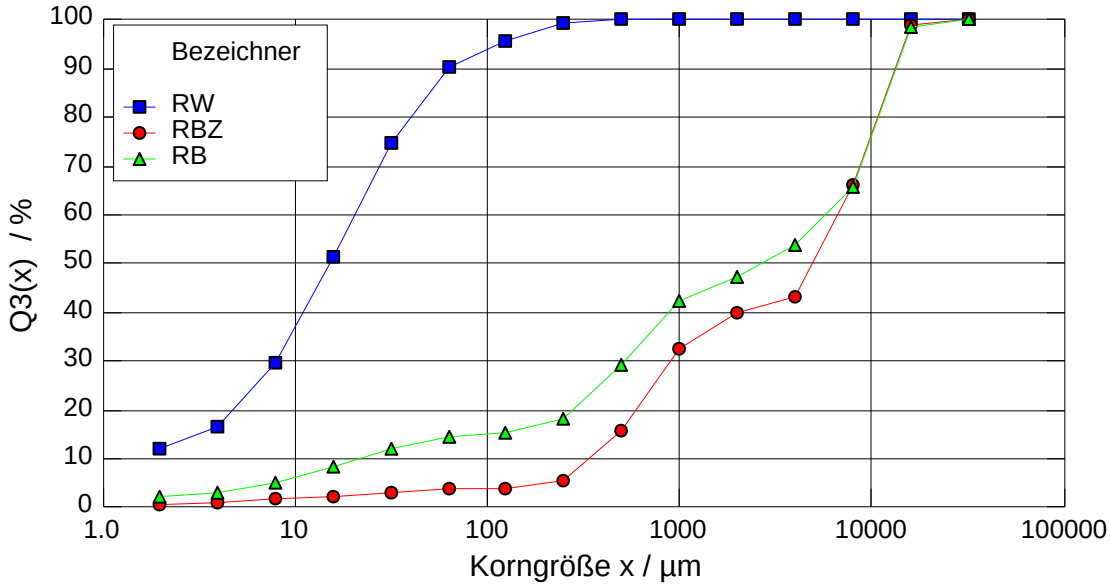
Lieferschein 9922, Durchsatz 18,9 kg/s

Korngröße			RW	RBZ	RB
Kornklassen			Q3(x)	Q3(x)	Q3(x)
µm			%	%	%
	<	2,000	11,52	0,38	1,80
2,000	-	4,000	16,18	0,70	2,53
4,000	-	8,000	29,20	1,30	4,57
8,000	-	16,000	51,15	2,04	8,01
16,000	-	31,500	74,40	2,73	11,65
31,500	-	63,000	89,92	3,33	14,08
63,000	-	125,000	95,37	3,61	14,93
125,000	-	250,000	99,06	5,00	17,78
250,000	-	500,000	99,92	15,51	28,98
500,000	-	1000,000	99,99	32,10	41,92
1000,000	-	2000,000	99,99	39,47	46,98
2000,000	-	4000,000	99,99	42,82	53,59
4000,000	-	8000,000	99,99	65,98	65,48
8000,000	-	16000,000	99,99	98,56	98,09
16000,000	-	32000,000	100,00	100,00	100,00
	>	32000,000	100,00	100,00	100,00

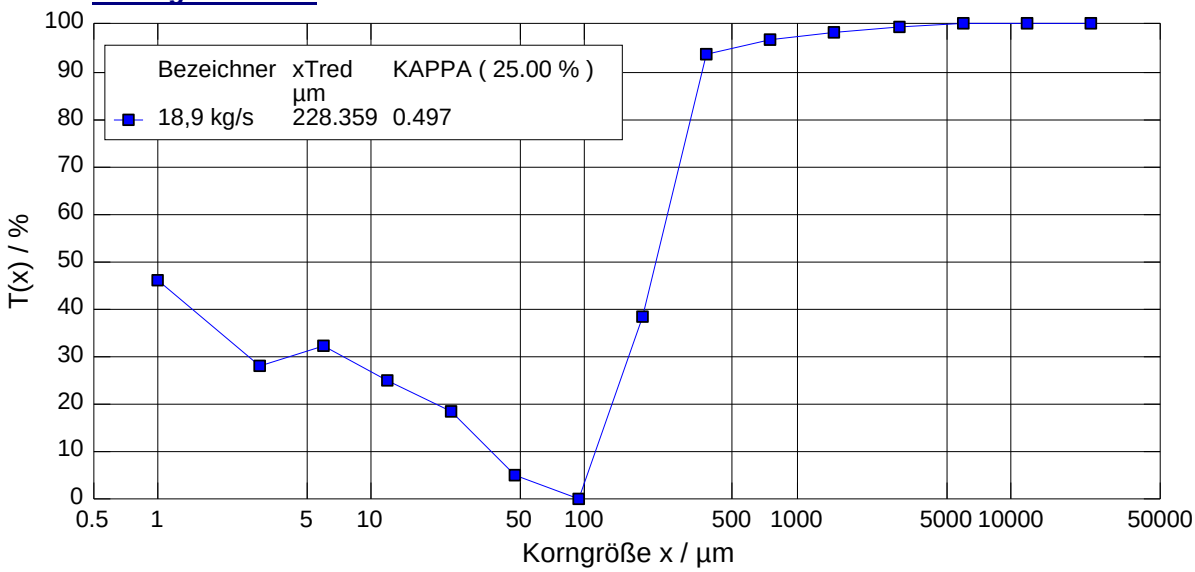
Korngröße			RW	RBZ	RB
Kornklassen			Fraktion p3	Fraktion p3	Fraktion p3
µm			%	%	%
	<	2,000	11,52	0,38	1,80
2,000	-	4,000	4,67	0,32	0,73
4,000	-	8,000	13,02	0,60	2,04
8,000	-	16,000	21,96	0,75	3,44
16,000	-	31,500	23,24	0,69	3,64
31,500	-	63,000	15,53	0,60	2,43
63,000	-	125,000	5,44	0,28	0,85
125,000	-	250,000	3,69	1,39	2,85
250,000	-	500,000	0,86	10,51	11,20
500,000	-	1000,000	0,07	16,59	12,94
1000,000	-	2000,000	0,00	7,37	5,06
2000,000	-	4000,000	0,00	3,35	6,61
4000,000	-	8000,000	0,00	23,16	11,89
8000,000	-	16000,000	0,00	32,58	32,61
16000,000	-	32000,000	0,01	1,44	1,91
	>	32000,000	0,00	0,00	0,00

Kenngröße		RW	RBZ	RB
Q3 (x=100.000 µm)	[%]	93,17	3,50	14,59
Q3 (x=200.000 µm)	[%]	97,58	4,44	16,64
x3 (Q=90.00 %)	[µm]	63,860	13898,097	14015,333
xm3	[µm]	33,935	6023,140	5506,982
x503	[µm]	15,580	5240,069	2913,767

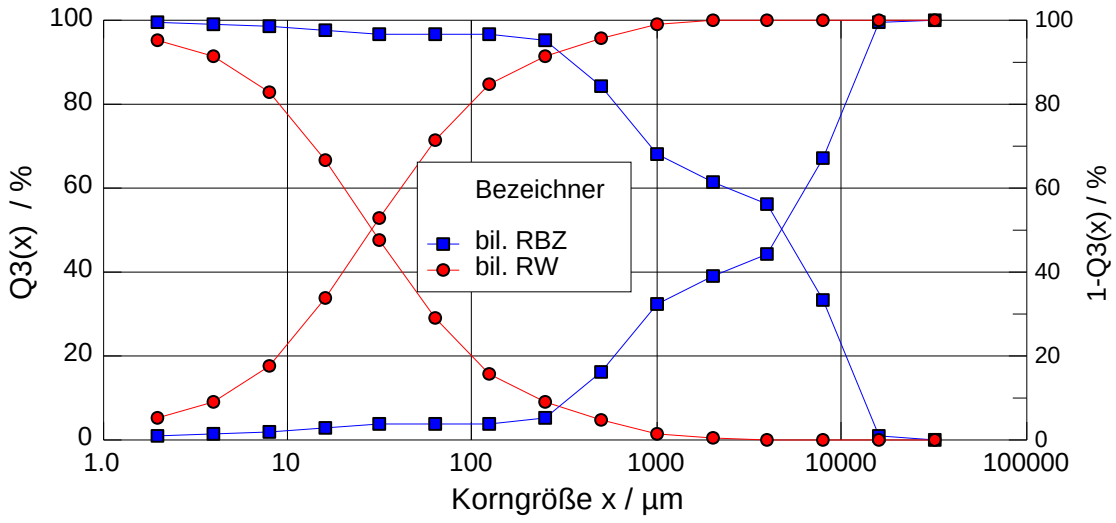
Körnungsdiagramm



Trenngradverlauf



Kornscheide



Versuch-Nr. 6

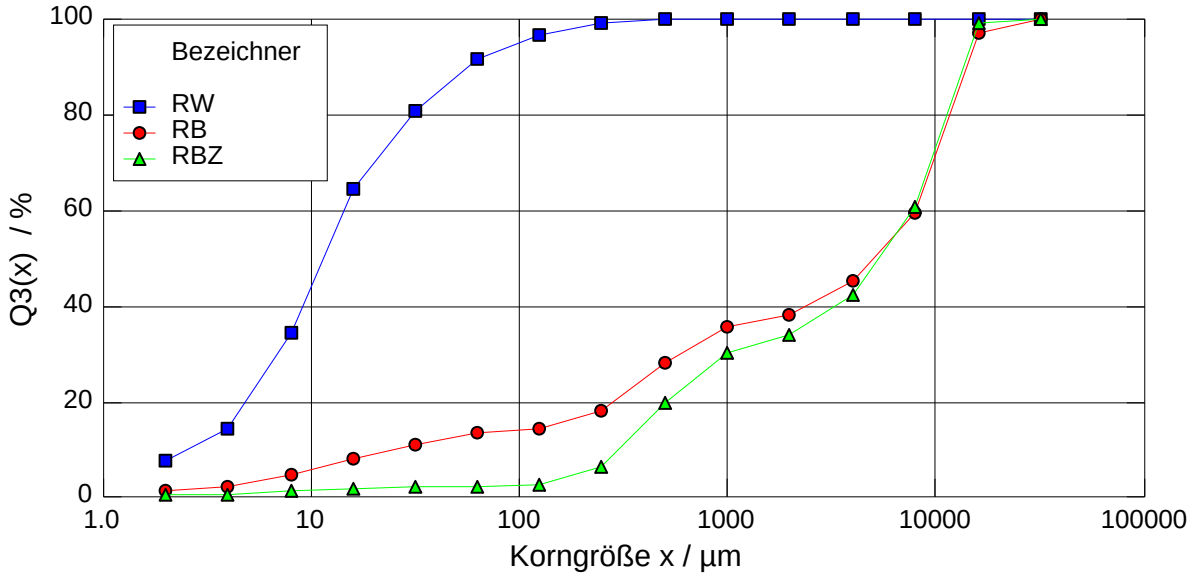
Serie LS 105 51, Durchsatz 50,0 kg/s

Korngröße			RW	RB	RBZ
Kornklassen			Q3(x)	Q3(x)	Q3(x)
µm			%	%	%
	<	2,000	7,42	1,21	0,21
2,000	-	4,000	14,10	2,05	0,39
4,000	-	8,000	33,99	4,21	0,86
8,000	-	16,000	64,12	7,61	1,43
16,000	-	31,500	80,63	10,77	1,72
31,500	-	63,000	91,31	13,12	1,95
63,000	-	125,000	96,48	14,18	2,11
125,000	-	250,000	99,15	17,97	6,13
250,000	-	500,000	99,85	27,89	19,33
500,000	-	1000,000	100,00	35,53	30,03
1000,000	-	2000,000	100,00	38,03	33,60
2000,000	-	4000,000	100,00	44,80	41,96
4000,000	-	8000,000	100,00	59,24	60,38
8000,000	-	16000,000	100,00	96,76	98,78
16000,000	-	32000,000	100,00	99,99	100,00
	>	32000,000	100,00	100,00	100,00

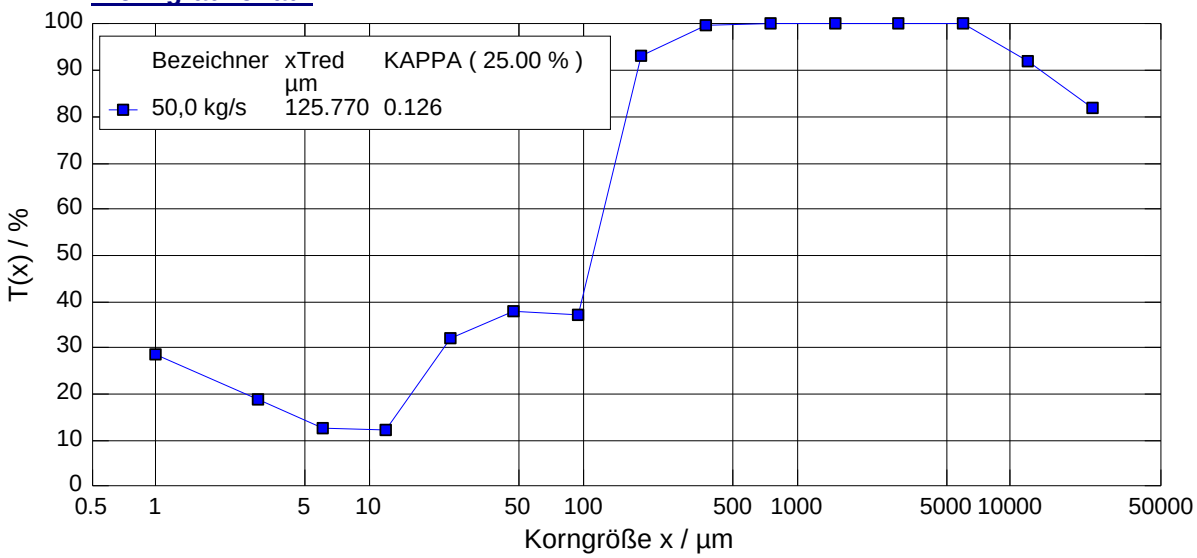
Korngröße			RW	RB	RBZ
Kornklassen			Fraktion p3	Fraktion p3	Fraktion p3
µm			%	%	%
	<	2,000	7,42	1,21	0,21
2,000	-	4,000	6,68	0,84	0,18
4,000	-	8,000	19,88	2,16	0,47
8,000	-	16,000	30,13	3,40	0,57
16,000	-	31,500	16,51	3,16	0,29
31,500	-	63,000	10,68	2,35	0,23
63,000	-	125,000	5,17	1,06	0,16
125,000	-	250,000	2,67	3,79	4,02
250,000	-	500,000	0,70	9,92	13,20
500,000	-	1000,000	0,15	7,64	10,70
1000,000	-	2000,000	0,00	2,50	3,57
2000,000	-	4000,000	0,00	6,77	8,36
4000,000	-	8000,000	0,00	14,44	18,42
8000,000	-	16000,000	0,00	37,52	38,40
16000,000	-	32000,000	0,00	3,23	1,22
	>	32000,000	0,00	0,01	0,00

Kenngröße		Restwasser	Restbeton	Restbetonzuschlag
Q3 (x=100.000 µm)	[%]	94,39	13,76	2,05
Q3 (x=200.000 µm)	[%]	98,08	16,46	4,52
x3 (Q=90.00 %)	[µm]	59,145	14557,996	14170,833
xm3	[µm]	27,730	6492,439	6448,070
x503	[µm]	12,252	5439,612	5745,928

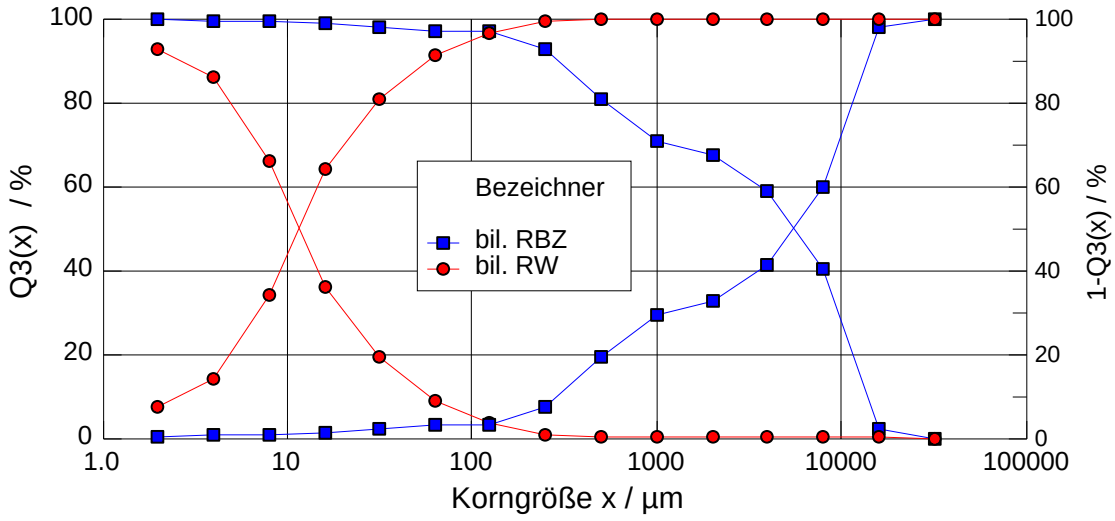
Körnungsdiagramm



Trenngradverlauf



Kornscheide



Versuch-Nr. 7

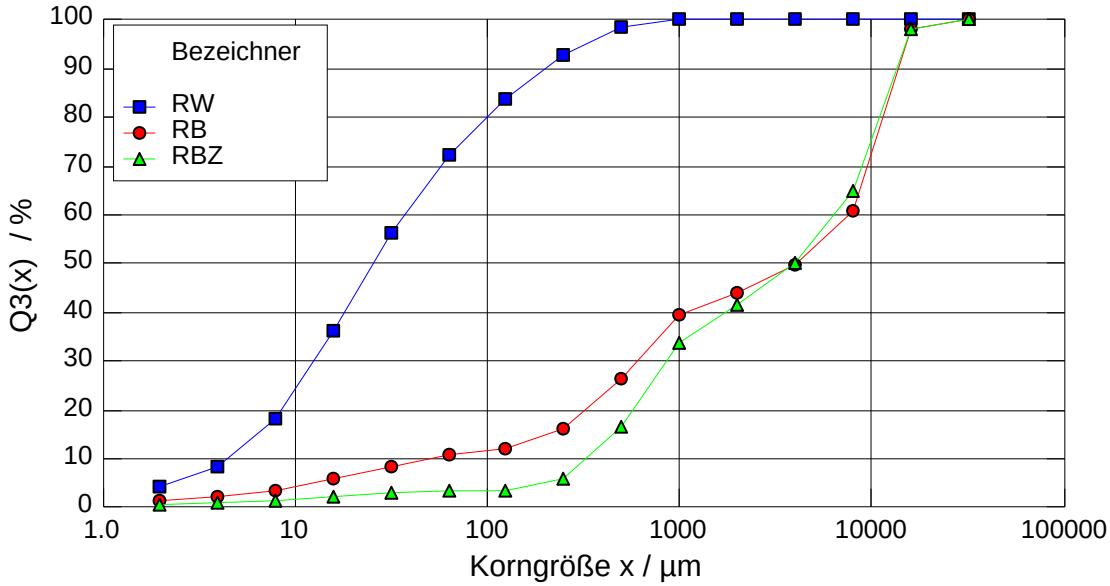
Lieferschein 9919, Durchsatz 51,3 kg/s

Korngröße			RW	RB	RBZ
Kornklassen			Q3(x)	Q3(x)	Q3(x)
µm			%	%	%
	<	2,000	4,09	1,07	0,24
2,000	-	4,000	8,15	1,77	0,46
4,000	-	8,000	17,70	3,26	0,93
8,000	-	16,000	35,98	5,56	1,78
16,000	-	31,500	55,77	8,06	2,53
31,500	-	63,000	71,96	10,29	3,04
63,000	-	125,000	83,41	11,55	3,24
125,000	-	250,000	92,46	15,60	5,62
250,000	-	500,000	98,26	25,90	16,17
500,000	-	1000,000	99,64	39,07	33,54
1000,000	-	2000,000	99,95	43,78	41,03
2000,000	-	4000,000	99,96	49,58	49,87
4000,000	-	8000,000	99,96	60,64	64,60
8000,000	-	16000,000	99,98	97,71	97,88
16000,000	-	32000,000	100,00	100,00	100,00
	>	32000,000	100,00	100,00	100,00

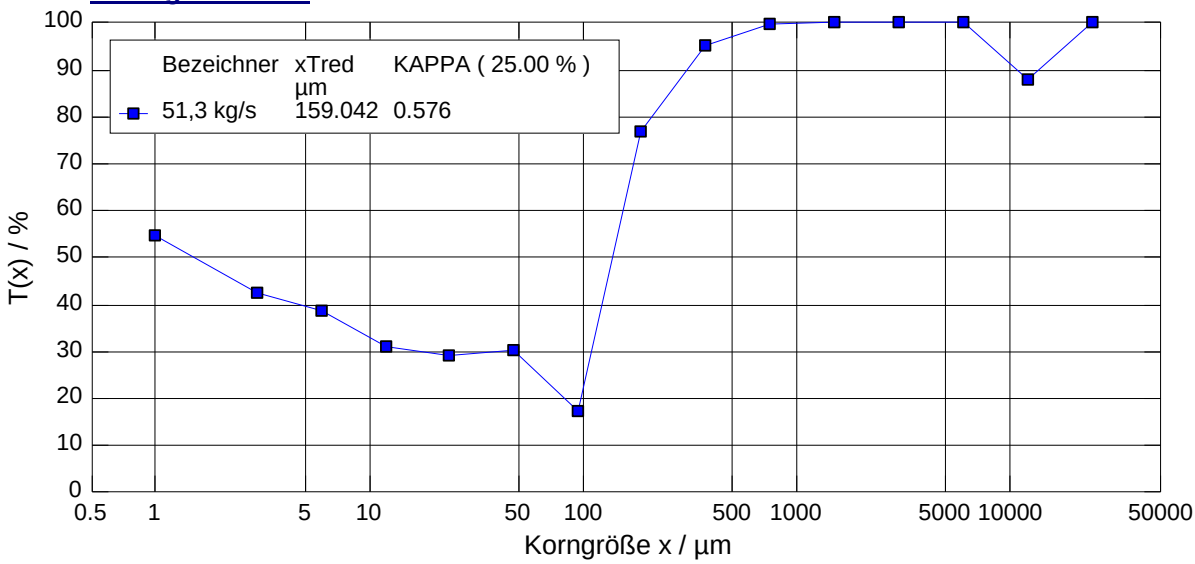
Korngröße			RW	RB	RBZ
Kornklassen			Fraktion p3	Fraktion p3	Fraktion p3
µm			%	%	%
	<	2,000	4,09	1,07	0,24
2,000	-	4,000	4,06	0,71	0,22
4,000	-	8,000	9,56	1,49	0,48
8,000	-	16,000	18,28	2,30	0,84
16,000	-	31,500	19,79	2,50	0,75
31,500	-	63,000	16,19	2,23	0,51
63,000	-	125,000	11,45	1,26	0,20
125,000	-	250,000	9,05	4,05	2,38
250,000	-	500,000	5,81	10,30	10,55
500,000	-	1000,000	1,37	13,17	17,37
1000,000	-	2000,000	0,32	4,71	7,49
2000,000	-	4000,000	0,00	5,80	8,84
4000,000	-	8000,000	0,01	11,06	14,73
8000,000	-	16000,000	0,01	37,07	33,28
16000,000	-	32000,000	0,02	2,29	2,12
	>	32000,000	0,00	0,00	0,00

Kenngröße		RW	RB	RBZ
Q3 (x=100.000 µm)	[%]	78,79	11,04	3,16
Q3 (x=200.000 µm)	[%]	88,84	13,98	4,67
x3 (Q=90.00 %)	[µm]	216,024	14336,121	14105,769
xm3	[µm]	87,545	6054,471	5938,798
x503	[µm]	26,978	4151,899	4035,302

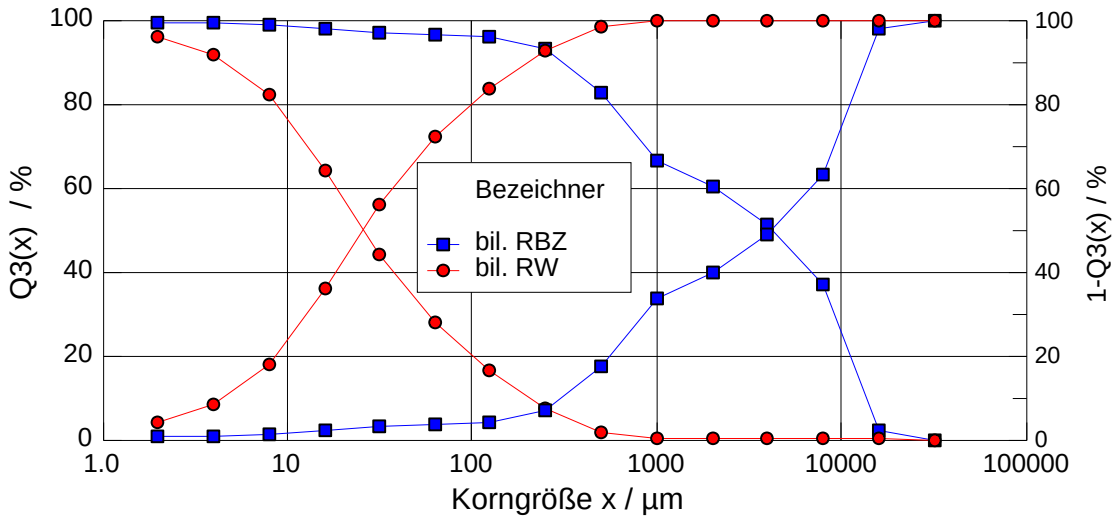
Körnungsdiagramm



Trenngradverlauf



Kornscheide



Versuch-Nr. 8

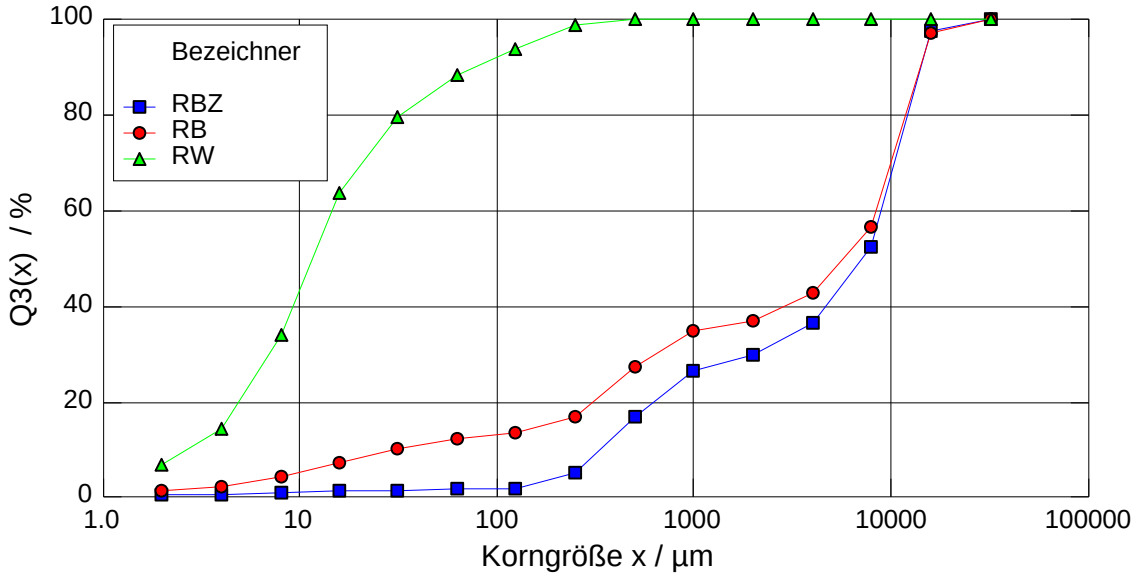
Serie: LS 105 50, Durchsatz 57,5 kg/s

Korngröße			RBZ	RB	RW
Kornklassen			Q3(x)	Q3(x)	Q3(x)
µm			%	%	%
	<	2,000	0,13	1,08	6,58
2,000	-	4,000	0,23	1,82	13,98
4,000	-	8,000	0,55	3,78	33,57
8,000	-	16,000	0,93	6,98	63,26
16,000	-	31,500	1,11	9,86	79,16
31,500	-	63,000	1,28	12,03	88,05
63,000	-	125,000	1,38	13,06	93,39
125,000	-	250,000	4,84	16,68	98,61
250,000	-	500,000	16,55	26,98	99,78
500,000	-	1000,000	26,30	34,38	100,00
1000,000	-	2000,000	29,43	36,66	100,00
2000,000	-	4000,000	36,18	42,53	100,00
4000,000	-	8000,000	52,24	56,19	100,00
8000,000	-	16000,000	97,09	96,70	100,00
16000,000	-	32000,000	100,00	100,00	100,00
	>	32000,000	100,00	100,00	100,00

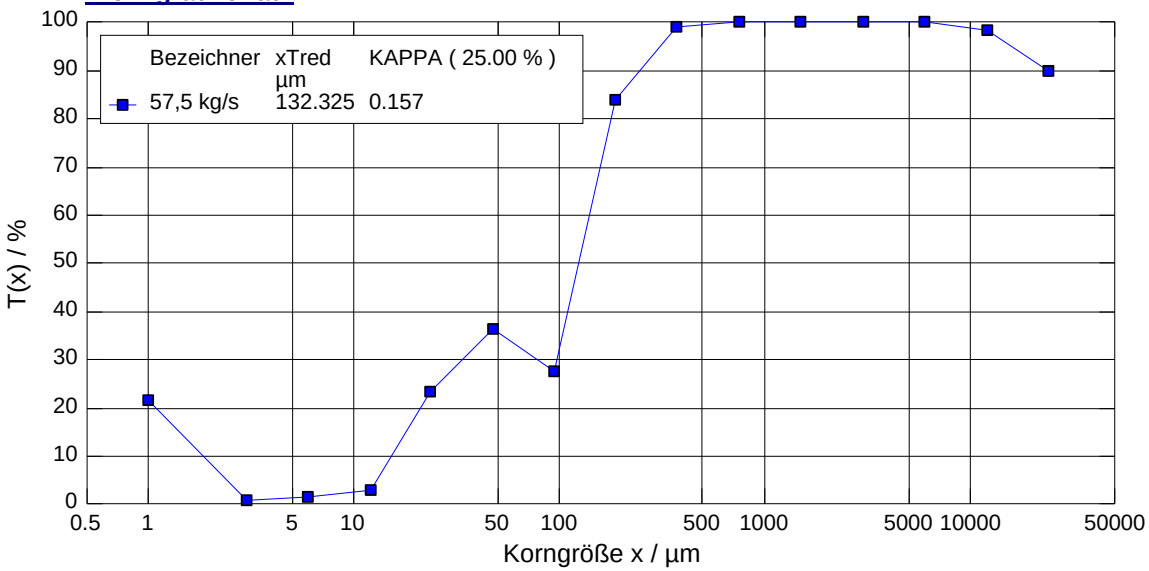
Korngröße			RBZ	RB	RW
Kornklassen			Fraktion p3	Fraktion p3	Fraktion p3
µm			%	%	%
	<	2,000	0,13	1,08	6,58
2,000	-	4,000	0,11	0,74	7,40
4,000	-	8,000	0,32	1,96	19,59
8,000	-	16,000	0,38	3,20	29,69
16,000	-	31,500	0,18	2,88	15,90
31,500	-	63,000	0,17	2,17	8,89
63,000	-	125,000	0,10	1,03	5,34
125,000	-	250,000	3,46	3,62	5,22
250,000	-	500,000	11,72	10,30	1,17
500,000	-	1000,000	9,75	7,40	0,22
1000,000	-	2000,000	3,12	2,28	0,00
2000,000	-	4000,000	6,75	5,87	0,00
4000,000	-	8000,000	16,07	13,66	0,00
8000,000	-	16000,000	44,85	40,51	0,00
16000,000	-	32000,000	2,90	3,30	0,00
	>	32000,000	0,00	0,00	0,00

Kenngröße		Restbetonzuschlag	Restbeton	Restwasser
Q3 (x=100.000 µm)	[%]	1,34	12,64	91,24
Q3 (x=200.000 µm)	[%]	3,45	15,23	96,52
x3 (Q=90.00 %)	[µm]	14734,448	14676,870	85,659
xm3	[µm]	7417,333	6787,225	34,067
x503	[µm]	7441,195	6187,408	12,426

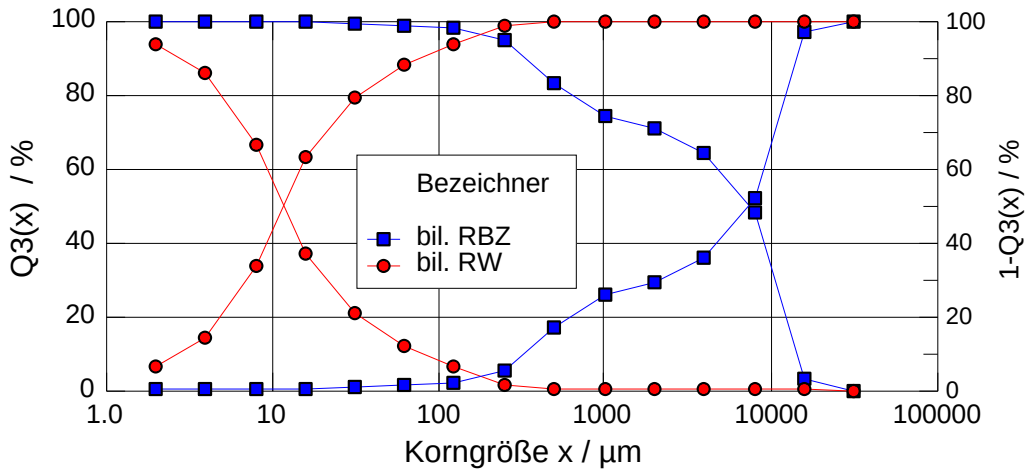
Körnungsdiagramm



Trenngradverlauf



Kornscheide



Versuch-Nr. 9

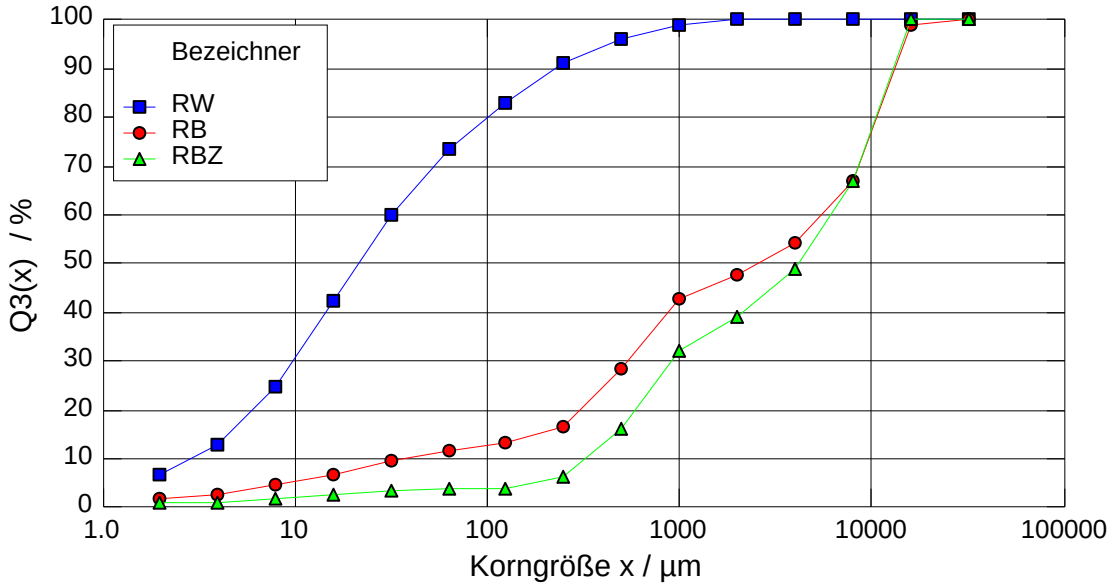
Lieferschein 9915, Durchsatz 71,95 kg/s

Korngröße			RW	RB	RBZ
Kornklassen			Q3(x)	Q3(x)	Q3(x)
µm			%	%	%
	<	2,000	6,55	1,28	0,44
2,000	-	4,000	12,58	2,26	0,81
4,000	-	8,000	24,29	4,10	1,51
8,000	-	16,000	42,01	6,52	2,34
16,000	-	31,500	59,69	9,13	2,99
31,500	-	63,000	73,11	11,43	3,46
63,000	-	125,000	82,75	12,71	3,65
125,000	-	250,000	90,95	16,35	5,75
250,000	-	500,000	95,76	28,13	15,94
500,000	-	1000,000	98,61	42,37	31,66
1000,000	-	2000,000	99,82	47,51	38,54
2000,000	-	4000,000	99,83	53,93	48,46
4000,000	-	8000,000	99,85	66,47	66,48
8000,000	-	16000,000	99,90	98,70	99,73
16000,000	-	32000,000	100,00	100,00	100,00
	>	32000,000	100,00	100,00	100,00

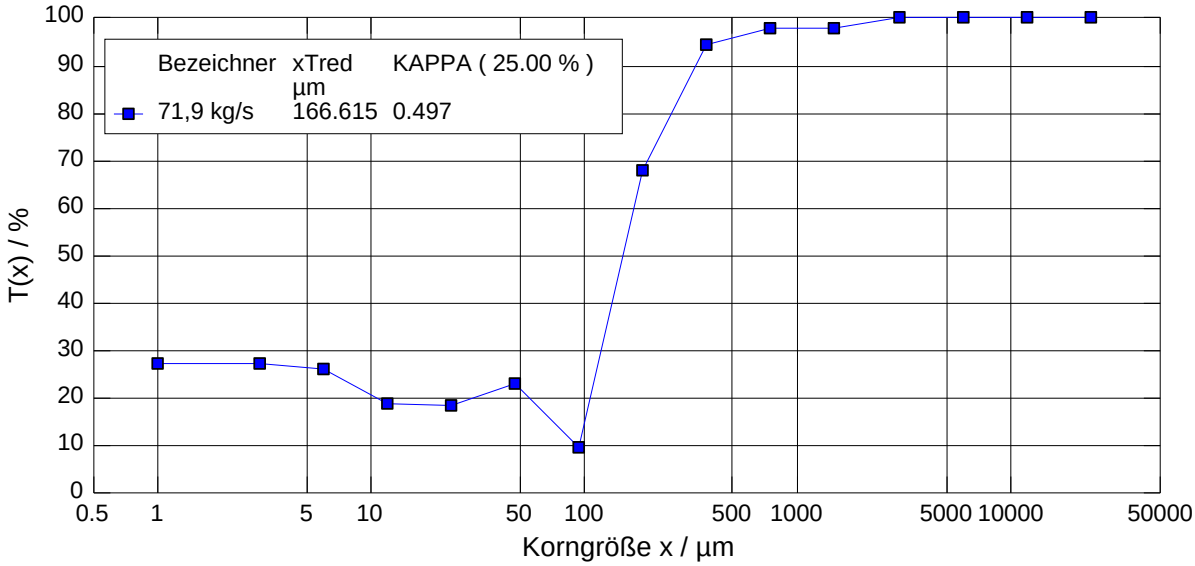
Korngröße			RW	RB	RBZ
Kornklassen			Fraktion p3	Fraktion p3	Fraktion p3
µm			%	%	%
	<	2,000	6,55	1,28	0,44
2,000	-	4,000	6,04	0,97	0,37
4,000	-	8,000	11,71	1,84	0,70
8,000	-	16,000	17,72	2,42	0,83
16,000	-	31,500	17,68	2,61	0,64
31,500	-	63,000	13,41	2,30	0,47
63,000	-	125,000	9,64	1,28	0,19
125,000	-	250,000	8,20	3,64	2,10
250,000	-	500,000	4,82	11,78	10,19
500,000	-	1000,000	2,84	14,24	15,72
1000,000	-	2000,000	1,21	5,14	6,88
2000,000	-	4000,000	0,01	6,42	9,92
4000,000	-	8000,000	0,02	12,54	18,02
8000,000	-	16000,000	0,05	32,23	33,25
16000,000	-	32000,000	0,10	1,30	0,27
	>	32000,000	0,00	0,00	0,00

Kenngröße		RW	RB	RBZ
Q3 (x=100.000 µm)	[%]	78,86	12,19	3,57
Q3 (x=200.000 µm)	[%]	87,67	14,89	4,91
x3 (Q=90.00 %)	[µm]	235,578	13840,521	13658,947
xm3	[µm]	126,601	5362,854	5697,560
x503	[µm]	23,003	2775,701	4341,842

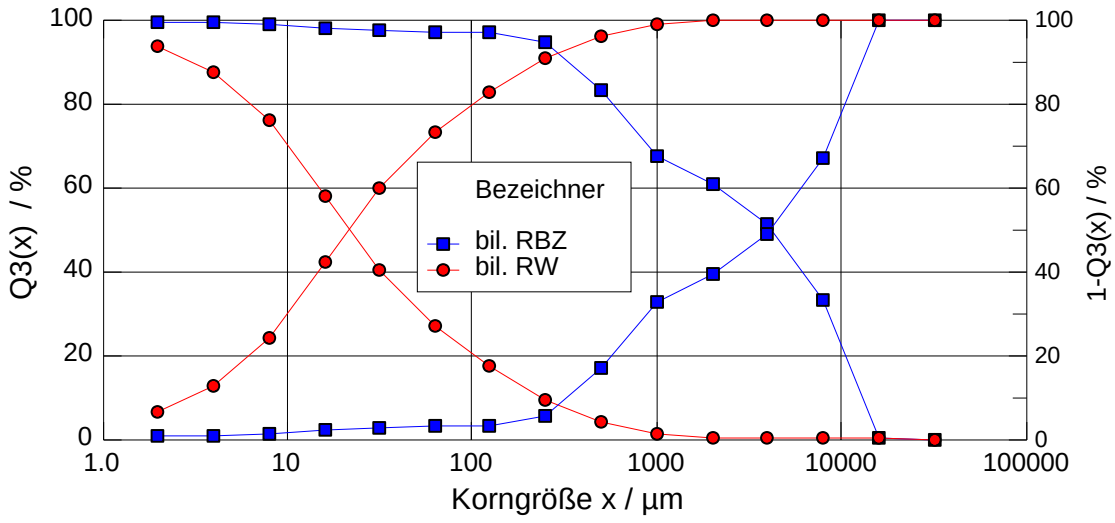
Körnungsdiagramm



Trenngradverlauf



Kornscheide



Versuch-Nr. 10

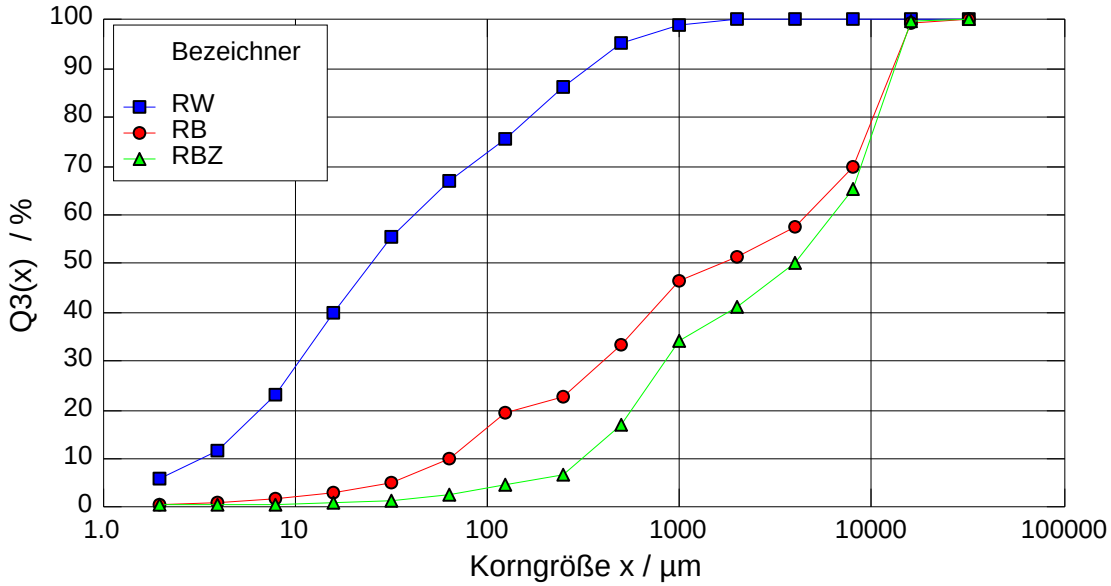
Lieferschein 9913, Durchsatz 73,5 kg/s

Korngröße			RW	RB	RBZ
Kornklassen			Q3(x)	Q3(x)	Q3(x)
µm			%	%	%
	<	2,000	5,53	0,31	0,07
2,000	-	4,000	11,40	0,62	0,14
4,000	-	8,000	22,90	1,23	0,27
8,000	-	16,000	39,62	2,46	0,55
16,000	-	31,500	55,17	4,85	1,08
31,500	-	63,000	66,59	9,70	2,15
63,000	-	125,000	75,20	19,25	4,27
125,000	-	250,000	86,04	22,27	6,40
250,000	-	500,000	94,99	32,87	16,68
500,000	-	1000,000	98,72	46,22	33,73
1000,000	-	2000,000	99,81	51,18	40,81
2000,000	-	4000,000	99,83	57,36	49,75
4000,000	-	8000,000	99,85	69,57	65,10
8000,000	-	16000,000	99,90	98,84	99,41
16000,000	-	32000,000	100,00	100,00	100,00
	>	32000,000	100,00	100,00	100,00

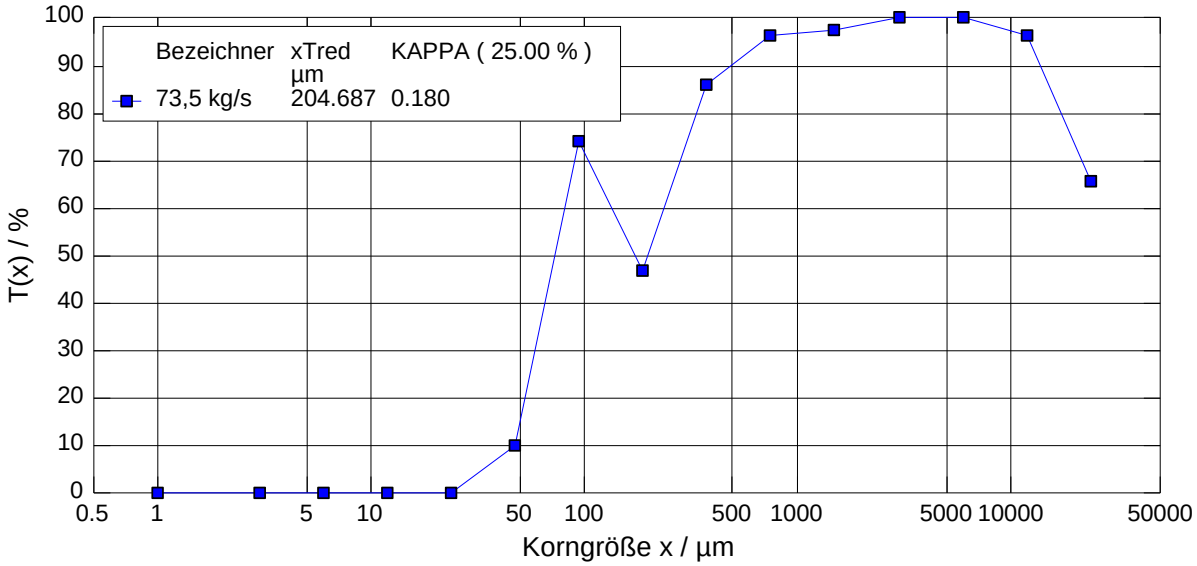
Korngröße			RW	RB	RBZ
Kornklassen			Fraktion p3	Fraktion p3	Fraktion p3
µm			%	%	%
	<	2,000	5,53	0,31	0,07
2,000	-	4,000	5,87	0,31	0,07
4,000	-	8,000	11,51	0,62	0,14
8,000	-	16,000	16,72	1,23	0,27
16,000	-	31,500	15,55	2,39	0,53
31,500	-	63,000	11,41	4,85	1,08
63,000	-	125,000	8,62	9,55	2,12
125,000	-	250,000	10,83	3,02	2,13
250,000	-	500,000	8,95	10,60	10,28
500,000	-	1000,000	3,73	13,35	17,05
1000,000	-	2000,000	1,09	4,96	7,08
2000,000	-	4000,000	0,01	6,18	8,94
4000,000	-	8000,000	0,02	12,21	15,35
8000,000	-	16000,000	0,05	29,27	34,31
16000,000	-	32000,000	0,10	1,16	0,59
	>	32000,000	0,00	0,00	0,00

Kenngröße		RW	RB	RBZ
Q3 (x=100.000 µm)	[%]	71,73	15,40	3,42
Q3 (x=200.000 µm)	[%]	81,70	21,06	5,55
x3 (Q=90.00 %)	[µm]	360,714	13583,874	13805,887
xm3	[µm]	150,192	4940,769	5727,288
x503	[µm]	26,343	1762,097	4065,147

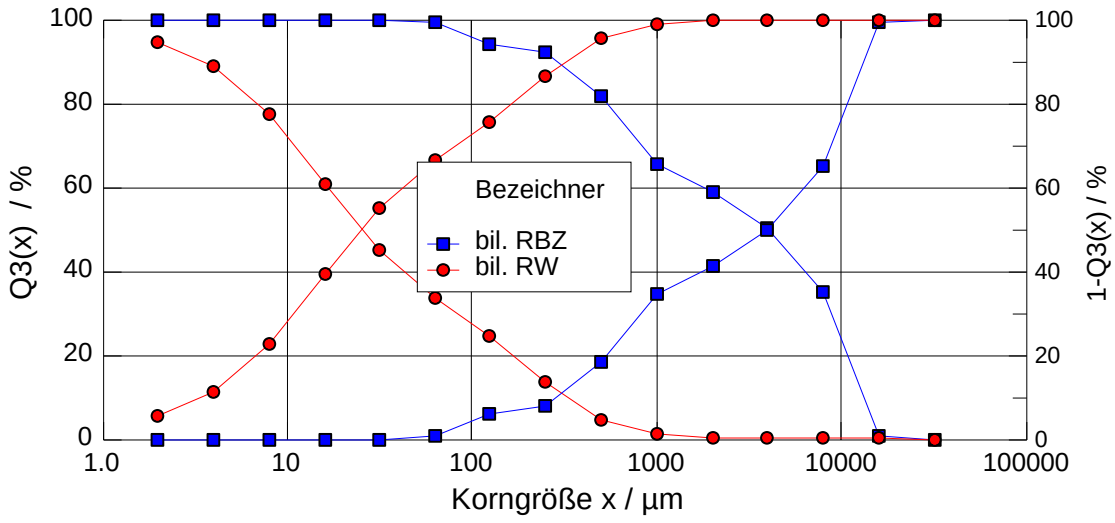
Körnungsdiagramm



Trenngradverlauf



Kornscheide



Versuch-Nr. 11

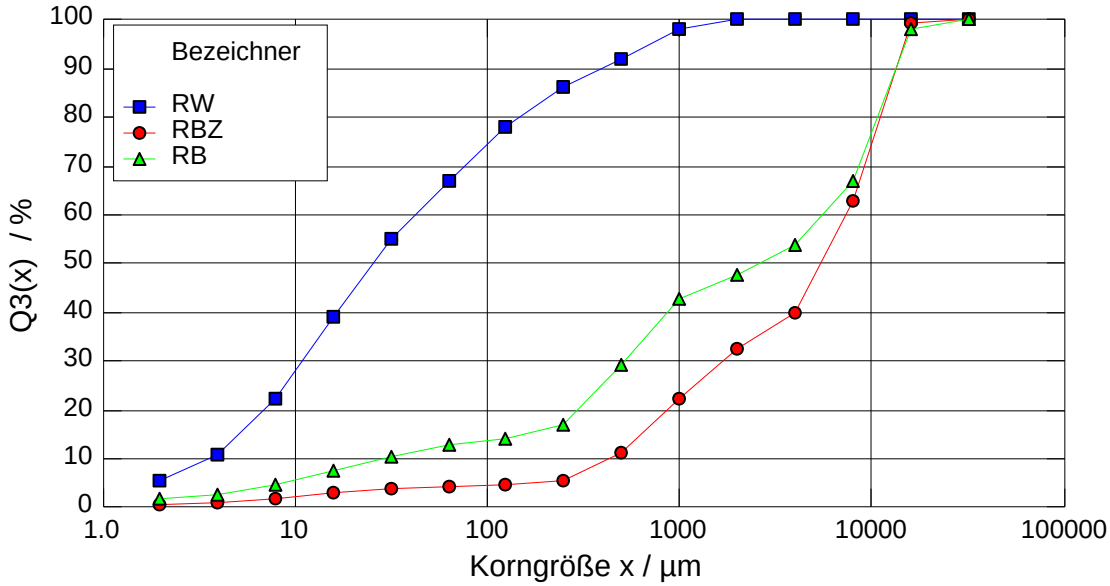
Lieferschein 9917, Durchsatz 86,95 kg/s

Korngröße			RW	RBZ	RB
Kornklassen			Q3(x)	Q3(x)	Q3(x)
µm			%	%	%
	<	2,000	5,10	0,36	1,28
2,000	-	4,000	10,37	0,64	2,17
4,000	-	8,000	21,85	1,40	4,17
8,000	-	16,000	38,70	2,61	7,03
16,000	-	31,500	54,64	3,44	9,88
31,500	-	63,000	66,74	3,95	12,36
63,000	-	125,000	77,81	4,12	13,85
125,000	-	250,000	86,02	5,15	16,61
250,000	-	500,000	91,75	10,96	28,97
500,000	-	1000,000	97,61	22,01	42,41
1000,000	-	2000,000	99,63	32,06	47,47
2000,000	-	4000,000	99,65	39,54	53,63
4000,000	-	8000,000	99,70	62,65	66,65
8000,000	-	16000,000	99,80	99,10	97,90
16000,000	-	32000,000	100,00	100,00	100,00
	>	32000,000	100,00	100,00	100,00

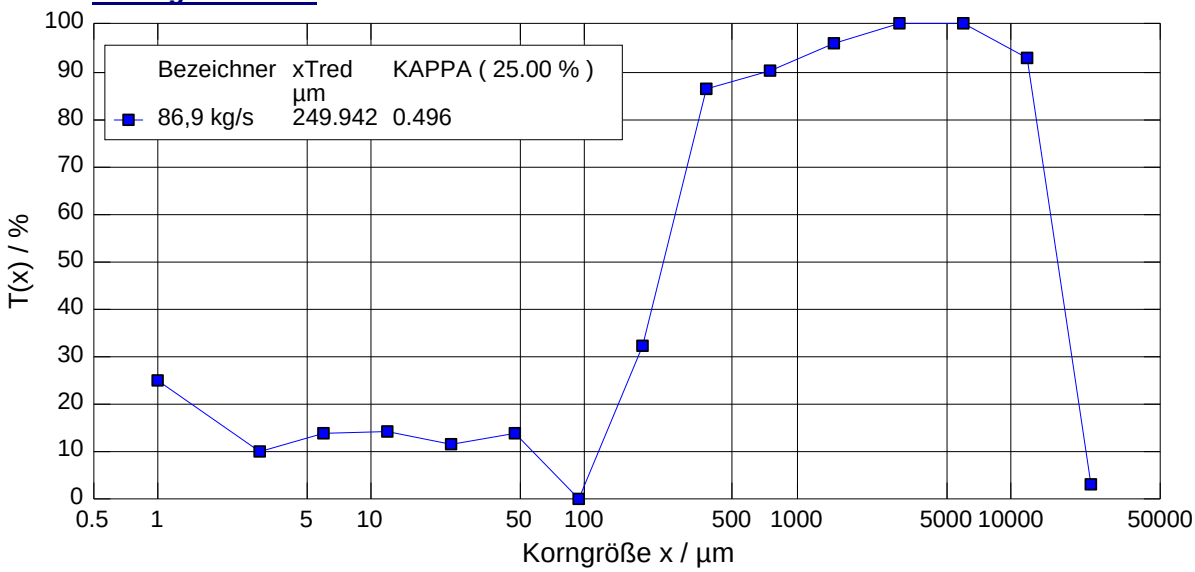
Korngröße			RW	RBZ	RB
Kornklassen			Fraktion p3	Fraktion p3	Fraktion p3
µm			%	%	%
	<	2,000	5,10	0,36	1,28
2,000	-	4,000	5,28	0,28	0,89
4,000	-	8,000	11,47	0,76	2,01
8,000	-	16,000	16,85	1,21	2,86
16,000	-	31,500	15,95	0,83	2,85
31,500	-	63,000	12,10	0,51	2,48
63,000	-	125,000	11,07	0,17	1,49
125,000	-	250,000	8,21	1,03	2,76
250,000	-	500,000	5,73	5,81	12,36
500,000	-	1000,000	5,86	11,05	13,44
1000,000	-	2000,000	2,02	10,05	5,06
2000,000	-	4000,000	0,02	7,48	6,16
4000,000	-	8000,000	0,05	23,11	13,02
8000,000	-	16000,000	0,10	36,45	31,25
16000,000	-	32000,000	0,20	0,90	2,10
	>	32000,000	0,00	0,00	0,00

Kenngröße		RW	RBZ	RB
Q3 (x=100.000 µm)	[%]	73,35	4,05	13,25
Q3 (x=200.000 µm)	[%]	82,74	4,74	15,51
x3 (Q=90.00 %)	[µm]	423,496	14002,743	13977,600
xm3	[µm]	196,979	6459,148	5451,976
x503	[µm]	26,986	5810,472	2821,429

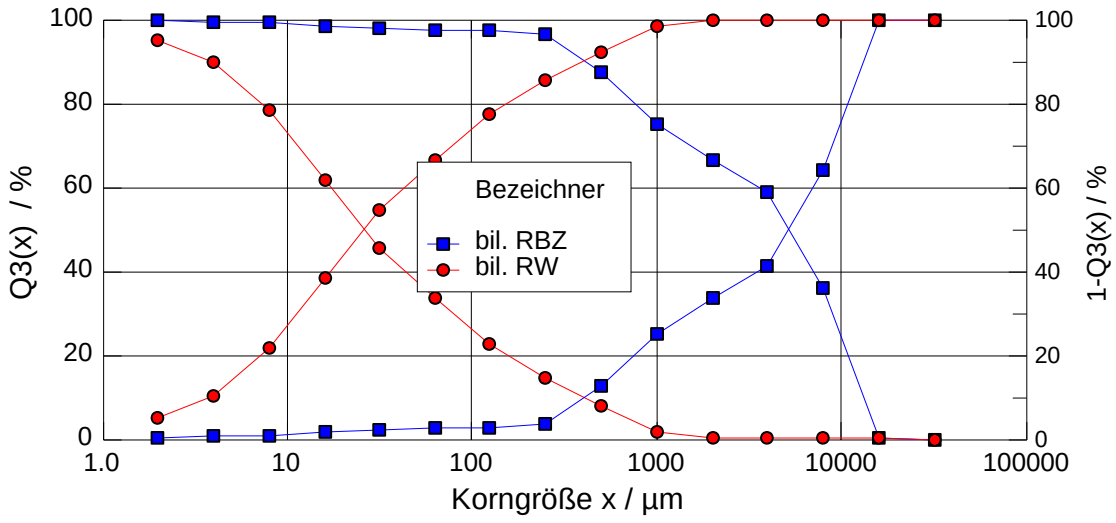
Körnungsdiagramm



Trenngradverlauf



Kornscheide



Versuch-Nr. 12

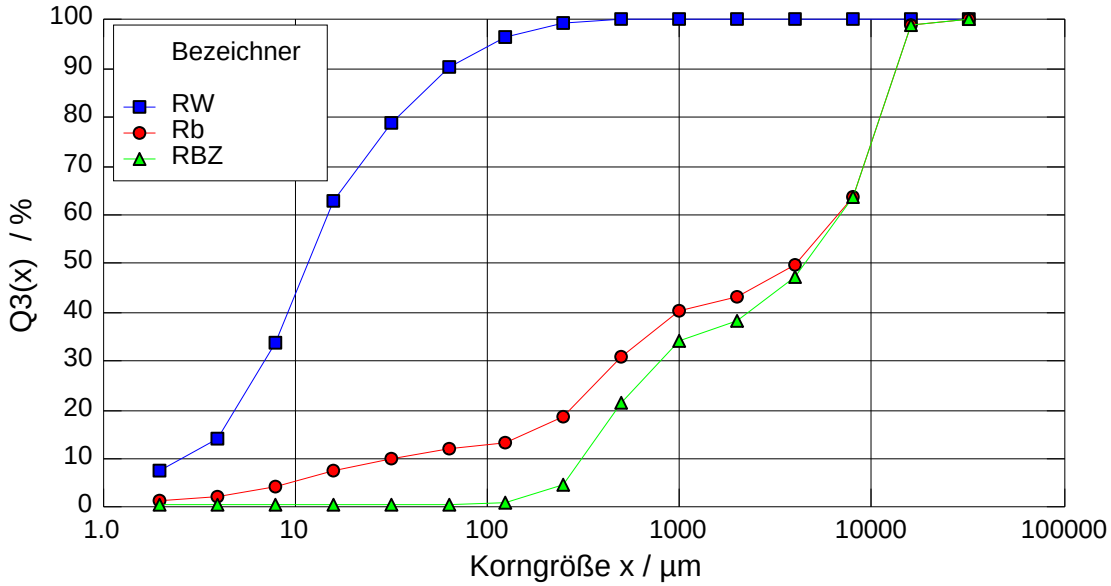
Lieferschein 10549, Durchsatz 105,4 kg/s

Korngröße			Restwasser	Restbeton	Restbetonzuschlag
Kornklassen			Q3(x)	Q3(x)	Q3(x)
µm			%	%	%
	<	2,000	7,19	1,10	0,03
2,000	-	4,000	13,90	1,85	0,06
4,000	-	8,000	33,33	3,91	0,15
8,000	-	16,000	62,42	7,12	0,27
16,000	-	31,500	78,63	9,78	0,33
31,500	-	63,000	89,77	11,82	0,37
63,000	-	125,000	96,21	12,81	0,52
125,000	-	250,000	98,84	18,21	4,27
250,000	-	500,000	99,82	30,65	21,13
500,000	-	1000,000	100,00	39,82	33,86
1000,000	-	2000,000	100,00	42,70	38,04
2000,000	-	4000,000	100,00	49,59	46,82
4000,000	-	8000,000	100,00	63,24	63,42
8000,000	-	16000,000	100,00	98,43	98,41
16000,000	-	32000,000	100,00	99,98	99,98
	>	32000,000	100,00	100,00	100,00

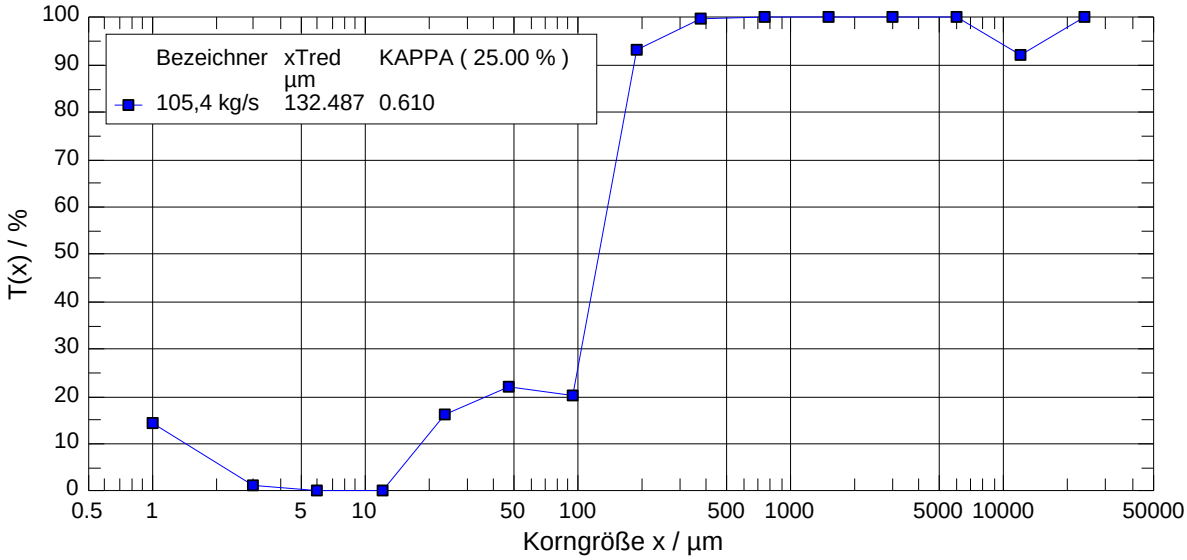
Korngröße			Restwasser	Restbeton	Restbetonzuschlag
Kornklassen			Fraktion p3	Fraktion p3	Fraktion p3
µm			%	%	%
	<	2,000	7,19	1,10	0,03
2,000	-	4,000	6,70	0,75	0,03
4,000	-	8,000	19,43	2,06	0,09
8,000	-	16,000	29,09	3,21	0,12
16,000	-	31,500	16,21	2,66	0,06
31,500	-	63,000	11,14	2,04	0,04
63,000	-	125,000	6,45	0,99	0,15
125,000	-	250,000	2,63	5,40	3,75
250,000	-	500,000	0,98	12,44	16,86
500,000	-	1000,000	0,18	9,17	12,73
1000,000	-	2000,000	0,00	2,88	4,18
2000,000	-	4000,000	0,00	6,89	8,78
4000,000	-	8000,000	0,00	13,65	16,60
8000,000	-	16000,000	0,00	35,19	34,99
16000,000	-	32000,000	0,00	1,55	1,57
	>	32000,000	0,00	0,02	0,02

Kenngröße		Restwasser	Restbeton	Restbetonzuschlag
Q3 (x=100.000 µm)	[%]	93,61	12,41	0,46
Q3 (x=200.000 µm)	[%]	97,79	16,05	2,77
x3 (Q=90.00 %)	[µm]	65,235	14083,546	14077,165
xm3	[µm]	30,095	5800,319	6071,626
x503	[µm]	12,584	4120,147	4766,265

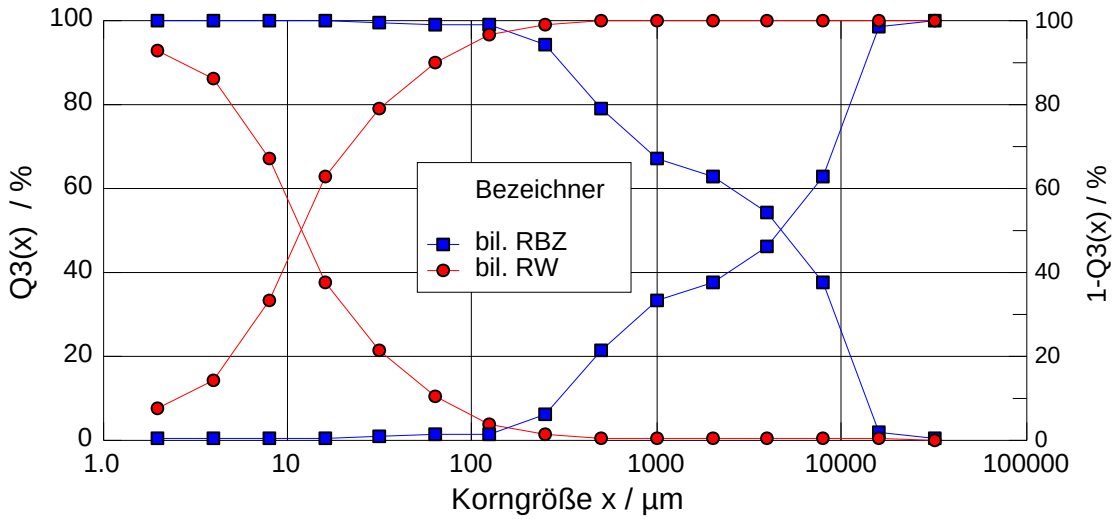
Körnungsdiagramm



Trenngradverlauf



Kornscheide



This document was created with Win2PDF available at http://www.daneprairie.com.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.